

Universidad Nacional de Piura

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Física



**“EFECTOS DE LA TEMPERATURA DE SINTESIS EN EL
INTERVALO DE 300°C A 500° C EN LA BANDA PROHIBIDA DE
PELÍCULAS DELGADAS DE ZnO SINTETIZADAS POR ROCIO
PIROLITICO”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN FÍSICA

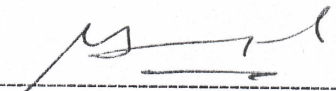
Br. Saúl Ernesto Campos Flores

Br. Marvin Florencio Julcahuanca Polo

PIURA – PERÚ

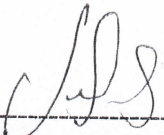
2015

Tesis aprobada por:



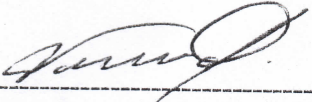
Lic Douglas Fidel Alvarado Paiva

Presidente



Lic Angel Carrasco Porras

Secretario



Lic Noe Valdivia Rodas
Vocal



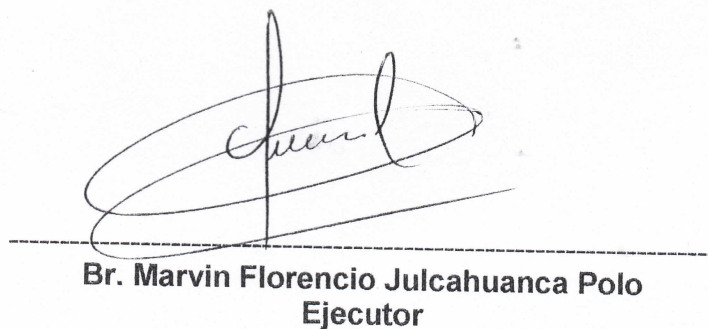
Lic. Javier Minchola Sánchez.
Asesor



Lic. Rodrigo Leandro Nima Maza.
Co- Asesor



Br. Saúl Ernesto Campos Flores
Ejecutor



Br. Marvin Florencio Julcahuanca Polo
Ejecutor



UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

FACULTAD DE CIENCIAS



ACTA DE SUSTENTACION N° 008-2015-FC-UNP

Los Miembros del Jurado Calificador que suscriben, reunidos para evaluar la Tesis denominada “ **EFFECTOS DE LA TEMPERATURA DE SÍNTESIS EN EL INTERVALO DE 300°C A 500°C EN LA BANDA PROHIBIDA DE PELÍCULAS DELGADAS DE ZnO SINTETIZADAS POR ROCÍO PIROLÍTICO** ” presentada por el señor Bachiller **MARVIN FLORENCIO JULCAHUANCA POLO**, oídas las observaciones y respuestas a las preguntas formuladas, y de conformidad al Reglamento de Tesis para obtener el Título Profesional en la Facultad de Ciencias, lo declaran :

APROBADO (X)

DESAPROBADO ()

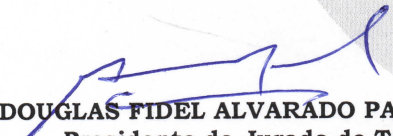
Con la mención de :

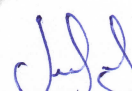
Muy Bueno

(X) En consecuencia, queda en condición de ser ratificado por el Consejo de Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Piura, y recibir el **TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA**.

(X) En consecuencia, queda en condición de ser ratificado por el Consejo Universitario de la Universidad Nacional de Piura, y recibir el **TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA**; después que el sustentante incorpore la sugerencia del Jurado Calificador.

Piura, 31 de marzo de 2015.


Lic. DOUGLAS FIDEL ALVARADO PAIVA, M. Sc.
Presidente de Jurado de Tesis


Lic. ANGEL CARRASCO PORRAS
Secretario de Jurado de Tesis


Lic. JOSÉ NOÉ VALDIVIA RODAS
Vocal de Jurado de Tesis

Dedicatoria

Dando en primer lugar gracias a nuestro Dios porque es Él quien nos bendice de alguna u otra manera día tras día. Dedicamos cada página de nuestra tesis a nuestros Padres y a nuestros Maestros que en este andar por la vida, influyeron con sus lecciones y experiencias para formarnos como unas personas de bien y preparándonos para los retos que pone la vida.

Presentación

La elaboración y fabricación de las películas delgadas de ZnO fueron realizadas en las instalaciones del Laboratorio de Física de Materiales, Sección Nanociencia, de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT) bajo el asesoramiento y colaboración de los Licenciados Javier Minchola Sánchez y Rodrigo Leandro Nima Maza.

Por tanto, habiendo nosotros cumplido con lo establecido por la Universidad Nacional de Piura para que optemos el título de Licenciado en Física, ponemos a su consideración el presente trabajo de investigación titulado: **“Efectos de la temperatura de síntesis en el intervalo de 300°C a 500°C en la banda prohibida de películas delgadas de ZnO sintetizadas por rocío pirolítico”**.

Agradecimientos

No sin antes darle gracias a Dios porque es quien nos da la sabiduría, agradecemos a nuestros Padres y Maestros que nos han formado y educado cada día, además de inculcarnos principios, valores y conocimientos.

De una manera muy especial tenemos que agradecer a nuestro Asesor el Lic Javier Minchola Sánchez por su gran apoyo sin condición, por sus constantes revisiones en los avances de este trabajo, y a nuestro Co–Asesor el Lic Rodrigo Leandro Nima Maza por su disposición y colaboración en la fabricación de las películas, además de sus sugerencias.

A todos y cada uno de ellos muchas gracias.

Índice general

Dedicatoria.....	I
Presentación.....	II
Agradecimientos.....	III
Índice General.....	IV
Índice de figuras.....	VI
Índice de tablas.....	IX
Resumen.....	X
Abstract.....	XI
Capítulo 1: Introducción.....	1
Capítulo 2: Generalidades.....	3
2.1 Estructuras de bandas del ZnO.....	3
2.2 Estructura del ZnO.....	5
2.3 Influencia de algunos parámetros en la síntesis de películas delgadas de ZnO.....	7
2.3.1 La temperatura y el espesor de las películas de ZnO sobre la estructura.....	7
2.3.2 El espesor de las películas delgadas de ZnO sobre la absorción óptica y el	
<i>band gap</i>	9

2.4 Técnicas de Síntesis de películas de ZnO.....	10
2.4.1 Molecular Beam Epitaxia (MBE).....	10
2.4.2 Magnetron sputtering (MS).....	11
2.4.3 La técnica de deposición por láser pulsado (PLD).....	12
2.4.4 Espray Pyrolysis.....	13
2.4.5 Sol-Gel.....	14
Capítulo 3: Materiales y métodos.....	16
3.1 Preparación de sustratos.....	16
3.2 Preparación de la solución.....	17
3.3 Síntesis de las películas de ZnO.....	17
3.4 Procedimiento experimental.....	18
3.5 Caracterización por difracción de rayos X.....	20
3.5.1 Difracción de rayos X.....	20
3.6 Mediciones de transmitancia óptica.....	22
Capítulo 4: Resultados y discusiones.....	24
4.1 Caracterización estructural de las películas de ZnO.....	24

4.1.1 Difracción de rayos X.....	24
4.1.2 Microscopia electrónica de barrido.....	27
4.2 Caracterización óptica: Transmitancia, absorbancia y banda prohibida.....	29
4.2.1 Transmitancia óptica.....	29
4.2.2 Absorbancia óptica.....	30
4.2.3 Banda prohibida.....	32
Capítulo 5: Conclusiones.....	36
Referencia bibliográfica.....	37
Anexos.....	38

Índice de figuras

Capítulo 2

Fig. 2.1 Estructura de banda (izquierda) y densidad de estados (derecha) para el ZnO. El cero de las gráficas se ha tomado como el filo superior de la banda de valencia.....	4
Fig. 2.2 Estructura hexagonal wurtzita, la zona sombreada de color rojo y morado denotan esferas átomos de O y Zn, respectivamente.....	6

Fig. 2.3 Red de cristal wurtzita de un monocristal de ZnO, en donde las más oscuras describen el zinc y las más claras el oxígeno.....	7
Fig.2.4 Patrón de difracción de rayos X de películas delgadas de ZnO a diferentes temperaturas de <i>síntesis</i>	7
Fig.2.5 Patrón de difracción de rayos X de películas de ZnO con diferente espesor.....	8
Fig.2.6 Difractograma de rayos X de películas delgadas de ZnO con espesores: (i) 55nm, (ii) 90nm, (iii) 165nm, (v) 260nm, (vi) 300nm, (vii) 400nm y (viii) 600nm.....	8
Fig. 2.7 Espectro de la absorbancia de películas de ZnO con espesores: (i) 55 nm, (ii) 90 nm, (iii) 165 nm, (iv) 180 nm, (v) 260 nm, (vi) 300 nm, (vii) 400 nm and (viii) 600 nm.....	9
Fig. 2.8 Esquema de un sistema MBE.....	11
Fig.2.9 Representación esquemática del proceso de pulverización magnetrón sputtering.....	12
Fig. 2.10 Esquema de un sistema PLD.....	13
Fig. 2.11 representación esquemática de un <i>Spray Pyrolysis Depositon</i> (SPD).....	14
Fig. 2.12 Descripción esquemática de las diferentes vías metodológicas que engloban las técnicas Sol-Gel.....	15

Capítulo 3

Fig.3.1 a) equipo de ultrasonido b) secador de sustratos c) balanza electrónica.....	16
---	----

Fig.3.2 Equipo de Hot plate-stirrer VWR.....	17
Fig. 3.3 Representación esquemática de un sistema de rociado pirolítico.....	18
Fig.3.4 Equipo de Rociado Pirolítico (Spray Pyrolysis), Lab. de Física de Materiales, Sección Nanociencia y Nanotecnología UN- Trujillo.....	19
Fig.3.5 Películas delgadas de ZnO.....	19
Fig. 3.6 Difracción de rayos debido a un cristal.....	21
Fig. 3.7 Esquema óptico de un espectrofotómetro UV-Vis empleado para determinar espectros de transmitancia y absorbancia óptica de películas delgadas de ZnO.....	23

Capítulo 4

Fig. 4.1 Difractogramas de películas delgadas de ZnO sintetizadas sobre vidrio Corning.....	24
Fig.4.2 Microscopio electrónico de barrido SEM.....	28
Fig. 4.3 Espesores de las películas de ZnO sintetizadas sobre sustratos de vidrio a las temperaturas de: (a) 300°C; (b) 350°C; (c) 400 y (d) 500°C.....	28
Fig. 4.4 Espectros de transmitancia de las películas de ZnO.....	29
Fig. 4.5 Espectros de absorbancia de películas de ZnO.....	31
Fig. 4.6 Banda prohibida de a) 300°C, b) 350°C, c) 400°C, d) 500°C.....	33

Fig. 4.7 Variación de la banda prohibida con la temperatura de síntesis en las películas de ZnO.....	34
---	----

Índice de tablas

Capítulo 4

Tabla 4.1 Valores correspondientes a la posición del pico (002), tamaño de grano, distancia interplanar y parámetro de red c	26
Tabla 4.2 Valores promedios del espesor de las películas de ZnO.....	29

Resumen

Se reporta el efecto de la temperatura de síntesis sobre la banda prohibida de películas delgadas de ZnO sintetizadas por técnica de rocío pirolítico sobre sustratos de vidrio corning. La solución precursora fue preparada usando acetato de Zinc dihidratado $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$ al 99.5%, disuelto en metanol a 0.2M bajo un proceso de agitación por ultrasonido a temperatura ambiente. La síntesis de las películas de ZnO sobre los sustratos se realizó a temperaturas de síntesis a 300, 350, 400 y 500°C. Los patrones de difracción por rayos X mostraron picos de difracción (002) y (101) correspondientes a la estructura wurtzita del ZnO. Mediciones de espectroscopia UV-Vis mostraron que la absorbancia aumenta conforme se incrementa la temperatura de síntesis, mientras que el ancho de la banda prohibida sufre una ligera disminución, lo cual podría ser atribuido al aumento del tamaño de grano y espesor o posible presencia de vacancias de oxígeno.

ABSTRACT

The effect of the synthesis temperature on the band gap of ZnO thin films synthesized by spray pyrolysis technique on Corning glass substrates is reported.

The precursor solution was prepared using zinc acetate dihydrate 99.5%, dissolved in methanol at 0.2M under ultrasound stirring process at room temperature. The synthesis of ZnO films on the substrates was performed at synthesis temperatures 300, 350, 400 and 500° C. Diffraction patterns showed X-ray diffraction peaks (002) and (101) corresponding to the wurtzite structure ZnO. Measurements UV-Vis spectroscopy showed that the absorbance as the synthesis temperature increases, while the width of the forbidden band undergoes a slight decrease, which could be attributed to increased grain size and thickness or possible presence of vacancies oxygen.

Capítulo 1

Introducción.

El estudio de las propiedades físicas de las películas delgadas es importante debido a sus múltiples aplicaciones tecnológicas y a sus características eléctricas, ópticas y mecánicas tan especiales que la hacen importante en la industria de la optoelectrónica y otros campos científicos. Actualmente, las películas semiconductoras basadas en óxidos conductores transparentes, están tomando cada vez mayor importancia debido a sus aplicaciones en la conversión fotovoltaica, así como en otros dispositivos electrónicos.

Como una película delgada exhibe propiedades piezoeléctricas los cuales son usados en varios transductores de presión, dispositivos opto-acústicos, detectores de radiación ultravioleta, diodos láser, celdas solares, sensores, etc. Las películas de ZnO tienen considerable atención porque ellas pueden tener alta conductividad eléctrica, alta reflectancia al infrarrojo y alta transmitancia visible. Precisamente estos tipos de materiales son más investigados porque presentan una característica importante, la cual se basa en la simultaneidad en que ocurre dos fenómenos: la alta transmitancia óptica en la región visible (>del 80%), y la alta conductividad eléctrica (alrededor de $10^5/\Omega.m$ o más). Diversas técnicas vienen siendo empleadas para preparar películas de ZnO tales como “*Pulsed-Laser Deposition*” (PLD), “*Molecular Beam Epitaxy*” (MBE), “*Magnetron Sputtering*” (MS), “*Spray Pyrolysis*” (SP) [1] y la técnica de Sol-Gel (SG).

La simplicidad del proceso rocío pirolítico, así como el fácil control de la composición de las películas, le confiere una gran ventaja frente a las otras técnicas de vacío antes mencionadas. Se ha reportado además que la modificación en la resistividad, estructura y las propiedades ópticas de las películas es posible mediante un tratamiento térmico post deposición. Por esta razón, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal estudiar el efecto de la temperatura de síntesis sobre la banda prohibida en películas delgadas de ZnO sintetizadas mediante rocío pirolítico. Las películas de ZnO fueron crecidas sobre sustratos de vidrio, a partir de una solución precursora de acetato de zinc dihidratado en metanol, la que fue depositada sobre el sustrato mediante el proceso de *spray pirolisys*[1]. La estructura y las propiedades de absorción óptica se realizaron con un difractómetro de rayos X y espectrofotómetro Uv-Vis respectivamente, para luego encontrar el ancho de banda prohibida usando el método de Tauc.

Capítulo 2

Generalidades.

2.1 Estructura de banda del ZnO.

El ZnO es un semiconductor para ser incorporado en la familia de materiales para aplicaciones de múltiples dispositivos funcionales, es de crítica importancia conocer su estructura de banda para explicar las propiedades eléctricas y ópticas debido a que determina la relación entre la energía y el momento lineal de los portadores. Una serie de datos experimentales han sido publicados respecto a la estructura de banda de los estados electrónicos del ZnO. Difracción por rayos X, absorción/emisión ultravioleta (UV) o técnicas de emisión son convencionalmente usados para medir los niveles electrónicos en sólidos. La estructura de banda del ZnO muestra bandas ocupadas y las bandas vacías (específicamente entre Γ_1 y $\Gamma_{1.5}$) separadas por una banda óptica prohibida o “*gap*” de aproximadamente 3,37 eV a 300 K. Esta es la diferencia de energía entre los estados electrónicos llenos y vacíos. Los estados vacíos sobre el ancho prohibido o *gap* son llamados banda de conducción. El punto más bajo en la banda de conducción es llamado *conduction band edge*. Dado que para el ZnO el borde superior de la banda de valencia y el borde inferior de la banda de conducción se encuentran alineados, el material es llamado semiconductor de banda prohibida directa. Para el ZnO, el borde de la banda de valencia es $K=0$, el punto Γ , que es también el valor K del borde de la banda de valencia. Puesto que para el ZnO los bordes de la banda de valencia y de conducción ocurren para los mismos valores de K , el material se le conoce como semiconductor de *band gap* directo (ver Fig. 2.1).

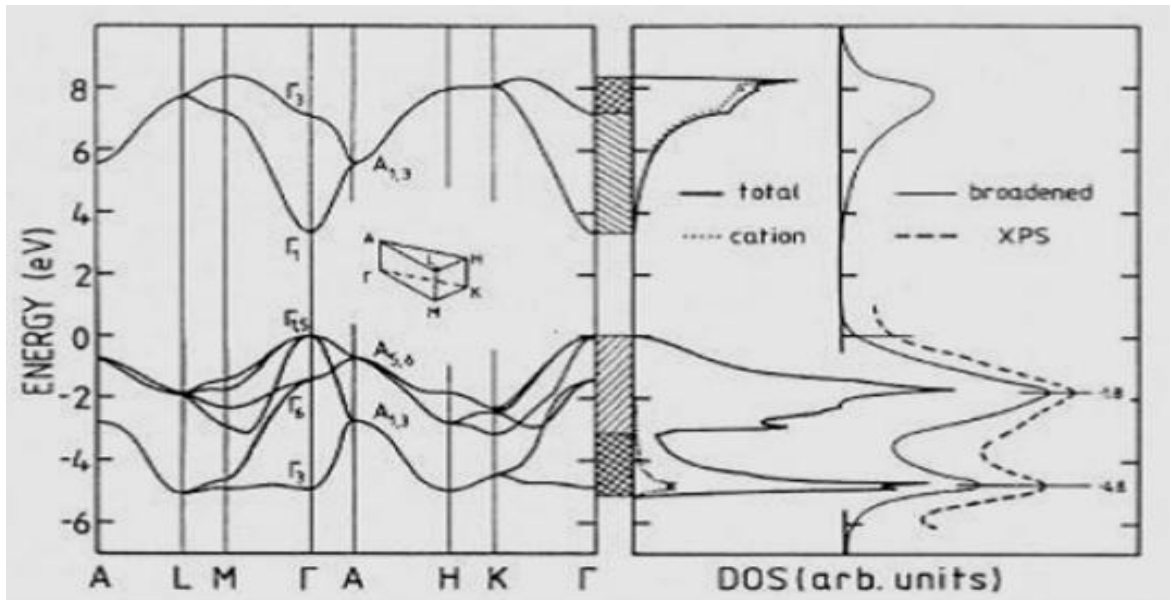


Fig. 2.1 Estructura de banda (izquierda) y densidad de estados (derecha) para el ZnO. El cero de las gráficas se ha tomado como el filo superior de la banda de valencia.

De la estructura de banda mostrada en la figura 2.1, seis bandas pueden verse entre -6 eV y 0 eV . Estas seis bandas de valencia corresponden a los orbitales $2p$ del oxígeno, que contribuye a la estructura de banda. Por debajo de -6 eV , entorno a -20 eV , la banda de valencia termina con el estado fundamental $2s$ del oxígeno. Esta banda específica no contribuye significativamente a la densidad de estados en la banda de conducción. Para la banda de conducción hay dos bandas visibles (sobre 3 eV). Estas bandas están fuertemente localizadas en el zinc y corresponde a los niveles desocupados Zn: $3s$.

2.2 Estructura del ZnO.

La mayoría de semiconductores compuestos binarios del tipo II-VI cristalizan en cualquiera de las siguientes dos estructuras Zinc-blenda cúbica o wurtzita hexagonal. (II-VI, significa que un elemento A de la columna II se une con otro elemento B de la columna VI de la tabla periódica, por ejemplo, ZnO, ZnS, CdTe, HgTe, etc.). La celda unitaria contiene dos cationes de zinc (Zn) y dos aniones de oxígeno (O). La diferencia de electronegatividades entre el zinc y el oxígeno produce un alto grado de ionicidad en su enlace, convirtiéndolo en uno de los compuestos más iónicos de dicha familia. Esto provoca una repulsión considerable entre sus nubes de carga, haciendo que su estructura cristalina más estable sea hexagonal tipo wurtzita. En dicha estructura los átomos se encuentran suficientemente alejados para compensar dichas repulsiones.

La figura 2.2 muestra una estructura hexagonal tipo wurtzita donde cada anión (O^{2-}) está rodeado por cuatro cationes (Zn^{2+}) en las esquinas de un tetraedro, y viceversa, como se muestran en el esquema de puntos rojos y morados. Esta coordinación tetraédrica es típica de unión covalente *sp*, pero estos materiales también tienen un carácter iónico. El grupo espacial de la estructura wurtzita es C_{6v}^4 ($P6_3mc$). La estructura wurtzita se puede describir como una combinación alternada de planos de átomos oxígeno y de planos de átomos de zinc apilados a lo largo del eje *c*, con un desplazamiento entre ellos de $0.38c$, siendo *c* su parámetro de red en la dirección vertical. Los valores de los parámetros de red para dicho material, en condiciones normales de presión y temperatura, son $a = 3.253 \text{ \AA}$ y $c = 5.213 \text{ \AA}$.

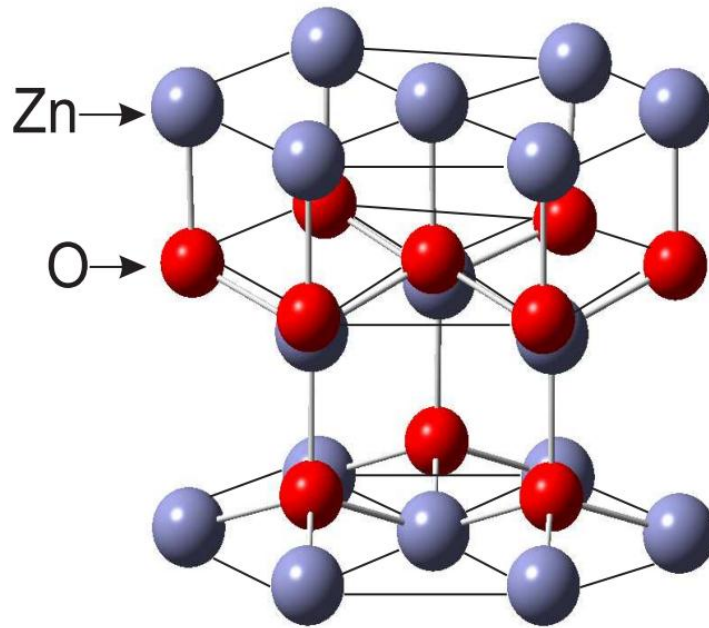


Fig. 2.2 Estructura hexagonal wurtzita, la zona sombreada de color rojo y morado denotan esferas átomos de O y Zn, respectivamente.

El ZnO cristaliza en dos estructuras cristalinas. La primera es la estructura wurtzita hexagonal; la segunda es la estructura cúbica rocksalt (NaCl) que se pueden obtener a relativamente altas presiones. A condiciones termodinámicas ambientales la fase más estable es la estructura wurtzita. La celda unidad contiene dos cationes zinc (Zn) y dos aniones de oxígeno (O) (ver Fig. 2.3). Las dos características importantes de la estructura wurtzita son: la simetría no central y superficies polares. Esta estructura de ZnO, puede ser descrita como un número de planos alternantes compuestos de iones O^{2-} y Zn^{2+} tetraédricamente coordinados, empaquetados alternadamente a lo largo del eje c . Los iones con cargas opuestas producen superficies polares cargadas positivamente (0001)-Zn y negativamente (0001)-O, tal como se puede ver en la figura 2.3, resultando un momento dipolar normal y una polarización espontánea a lo largo del eje c , así como, una divergencia en la superficie de energía.

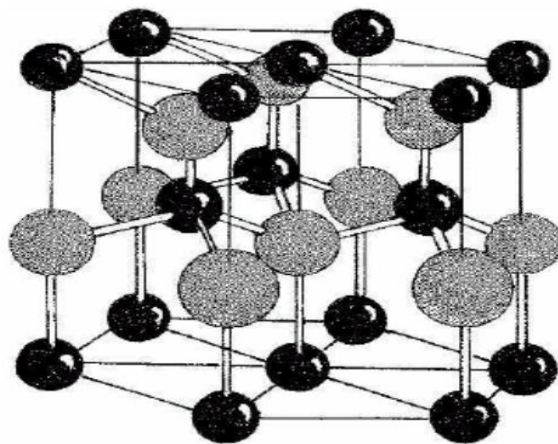


Fig. 2.3 Red de cristal wurtzita de un monocristal de ZnO, en donde las más oscuras describen el zinc y las más claras el oxígeno.

2.3 Influencia de algunos parámetros en la síntesis de películas delgadas de ZnO.

2.3.1 La temperatura y el espesor de las películas de ZnO sobre la estructura:

Muchos investigadores han preparado películas de ZnO con la técnica rocío pirolítico. Además de reportar en la estructura de las películas de ZnO una dirección preferente (002) con la temperaturas de *síntesis* ente 300 a 600°C, las investigaciones muestran un incremento de la intensidad del pico de difracción a medida que la temperatura se incrementa (ver figura 2.4).

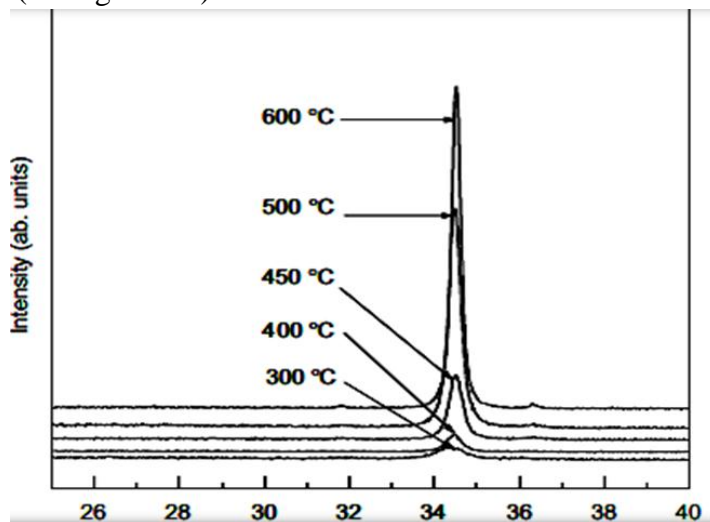


Fig.2.4 Patrón de difracción de rayos X de películas delgadas de ZnO a diferentes temperaturas de síntesis.

Así también, un efecto importante a considerar sobre la estructura es el espesor de las películas sintetizadas. Tal como se muestra en el figura 2.5, el espesor que muestra una óptima estructura con dirección preferente (002) son los que se encuentran entre 60 y 208 nm; sobresaliendo la de mayor espesor. Un dato importante a tener en cuenta en este aspecto, nos da S. Mridha, D. Basak. Por encima de un espesor crítico de 260 nm, la película de ZnO empieza a ser aleatoriamente orientada mientras que para espesores menores, el incremento preferencial está en la dirección de (002) (ver figura 2.6).

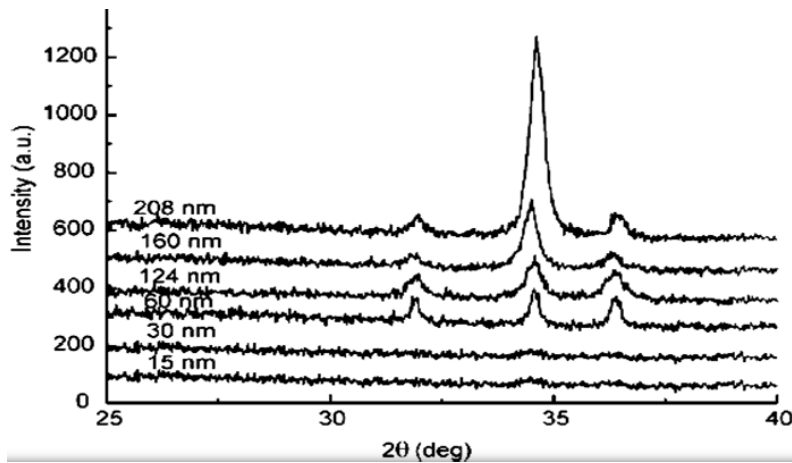


Fig.2.5 Patrón de difracción de rayos X de películas de ZnO con diferente espesor.

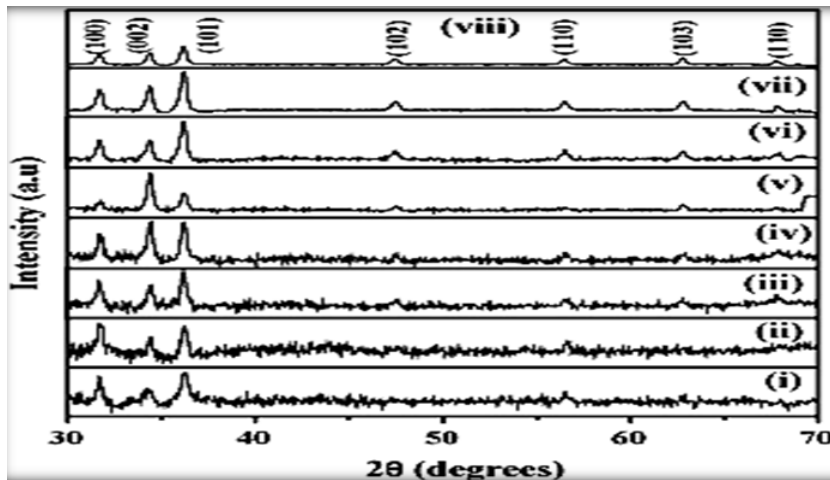


Fig.2.6 Difractograma de rayos X de películas delgadas de ZnO con espesores: (i) 55nm, (ii) 90nm, (iii) 165nm, (v) 260nm, (vi) 300nm, (vii) 400nm y (viii) 600nm.

2.3.2 El espesor de las películas delgadas de ZnO sobre la absorción óptica y el *band gap*:

Se ha estudiado la absorbancia óptica como función del espesor de películas delgadas de ZnO, como se muestra en la figura 2.7. Se observa una clara naturaleza excitónica del espectro de absorción en las películas delgadas de ZnO con espesores dentro del rango de 165nm - 300nm, lo cual indica una buena calidad óptica en dicho rango de espesores. Esto es atribuido a una reducción del stress y un mejoramiento de la cristalinidad con el incremento del espesor. Por encima de los 300nm de espesor, la naturaleza excitónica en el espectro se amplía y desaparece completamente para la película de 600 nm, probablemente debido al estrés y deterioro de la cristalinidad. Se muestra en el gráfico 2.7 la variación del *band gap* con el espesor de las películas de ZnO. Se muestra que el *band gap* se incrementa con el incremento del espesor hasta alcanzar un valor máximo para la película 165nm y posteriormente, el *band gap* decrece. Estos cambios en los valores del *band gap* son atribuidos a los cambios de los valores de la tensión.

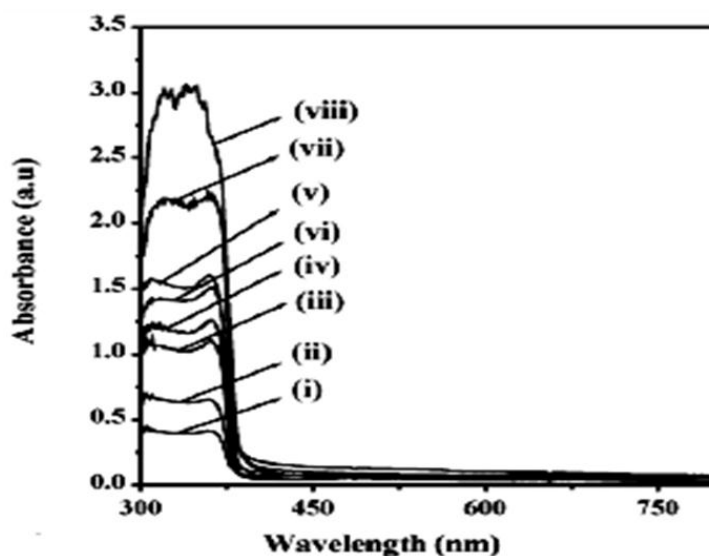


Fig. 2.7 Espectro de la absorbancia de películas de ZnO con espesores: (i) 55 nm, (ii) 90 nm, (iii) 165 nm, (iv) 180 nm, (v) 260 nm, (vi) 300 nm, (vii) 400 nm and (viii) 600 nm.

2.4 Técnicas de Síntesis de películas de ZnO.

Es importante conocer algunas técnicas de fabricación de películas delgadas de ZnO:

2.4.1 Molecular Beam Epitaxia (MBE):

El término epitaxia se refiere a un proceso de crecimiento orientado de una película sobre un sustrato. Esta técnica es el resultado del perfeccionamiento del método de evaporación de metales en el vacío. La epitaxia de haces moleculares es una técnica de vaporación de ultravacío, diseñado para el crecimiento epitaxial de metales, óxidos y metales superconductores. El ultravacío asegura la producción de capas finas, homogéneas y capas epitaxiales de alta pureza. La precisión en el grosor puede llegar a monocapas atómicas.

El sustrato donde se produce el crecimiento se mantiene a una temperatura elevada para que lleguen átomos de Zn y O con suficiente energía para que se puedan mover sobre la superficie del sustrato y encontrar su correcta posición de enlace. Si la temperatura es demasiado elevada, estos átomos se pueden reevaporar de la superficie, mientras que si la temperatura es demasiado baja, la calidad de los cristales de la capa de ZnO que se hacen crecer será pobre las fuentes de los materiales componentes para el ZnO deben de ser de muy alta pureza estos son evaporados desde un horno hacia al sustrato, el oxígeno es derivado del plasma o de la fuente de ozono. La figura 2.8 muestra un esquema típico del sistema MBE.

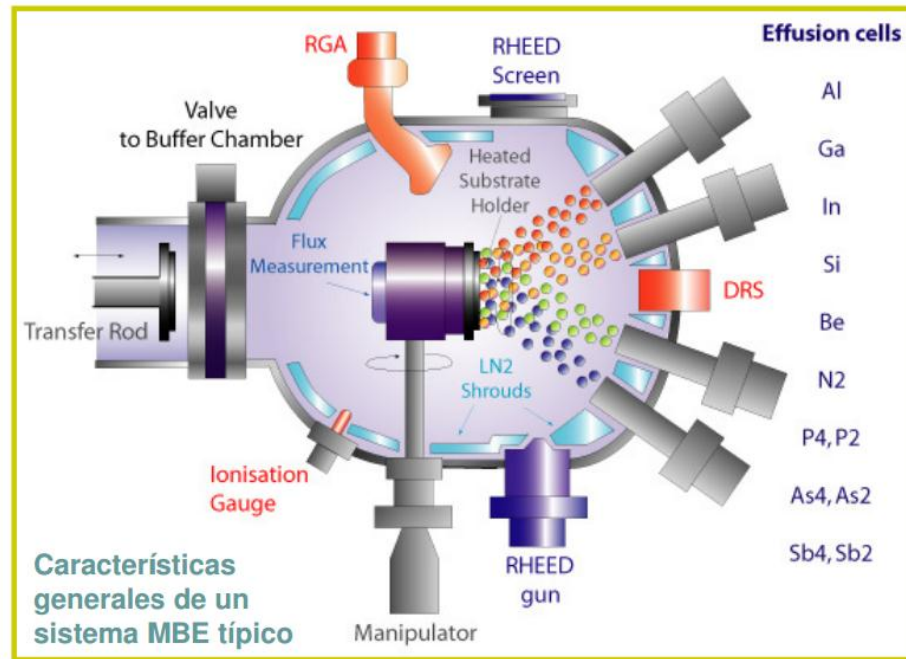


Fig. 2.8 esquema de un sistema MBE

2.4.2 Magnetron Sputtering (MS):

Esta técnica utiliza el principio de *sputtering* que consiste en el bombardeo de iones positivos, normalmente de un gas inerte sobre el blanco que contiene el material a depositar, adquiriendo de esta manera los átomos del blanco una energía cinética por la transferencia de momentum entre los iones y los átomos del blanco, una vez arrancados los átomos del blanco y manteniendo el objetivo a un potencial negativo con respecto a los átomos ionizados positivamente estos son acelerados hacia el cátodo donde se encuentra el sustrato que formará la película. La característica básica de una descarga de átomos con el *magnetron sputtering* es el confinamiento de plasma cerca de blanco (cátodo). Esto es mejorado por una combinación de campos magnéticos y eléctricos, en la figura 2.9 se muestra un esquema del proceso de pulverización.

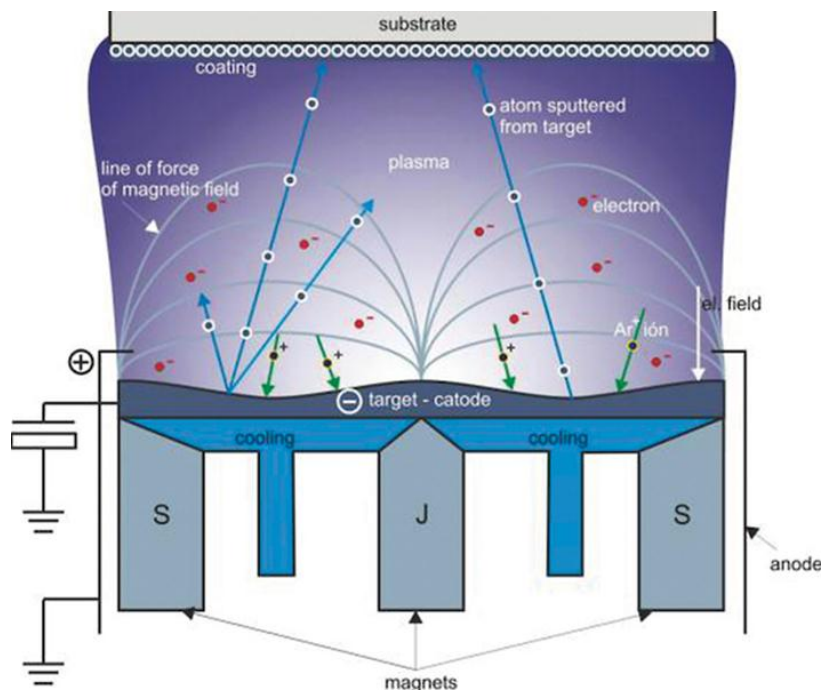


Fig.2.9 Representación esquemática del proceso de pulverización magnetrón sputtering.

Entre los distintos métodos de crecimiento este método para elaborar películas de ZnO es apropiado por el crecimiento uniforme y transparente de películas de ZnO a bajas temperaturas.

2.4.3 La técnica de deposición por láser pulsado (PLD):

Esta técnica depende de los parámetros del pulso láser (fluencia, duración del pulso, longitud de onda, tasa de repetición y polarización) así como, las propiedades del material irradiado, uno de los principales objetivos de esta técnica es poder replicar en la capa depositada la estequiometría del blanco utilizado. El método consiste en que cuando un pulso láser es enfocado y dirigido hacia el blanco en una cámara de vacío (Figura 2.9). El pulso láser calienta y vaporiza la superficie del blanco, produciendo un plasma o pluma de átomos (iones y moléculas). El plasma del material es depositado en un sustrato

adyacente para producir una película cristalina. Este proceso se lleva a cabo en el vacío por las siguientes razones: Conseguir que el material se volatilice a una temperatura menor de la que se requiere para llevar a cabo la operación a la presión atmosférica y evitar las presencias de átomos extraños que, al condensarse, junto con el material que se evapora, contaminaría la película.

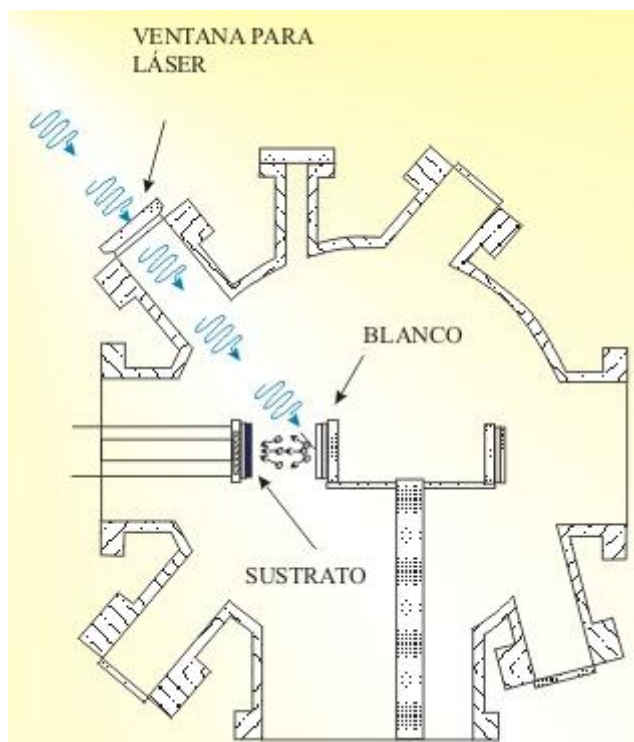


Fig. 2.10 Esquema de un sistema PLD

2.4.4 Espray Pyrolysis:

En esta técnica de rocío pirolítico, la solución iónica de los compuestos que contienen a los precursores del óxido de zinc es arrastrada por el gas portador hasta una boquilla, donde es rociada en gotas muy pequeñas sobre el sustrato, el cual está caliente, provocándose la evaporación del solvente y una reacción de las sales.

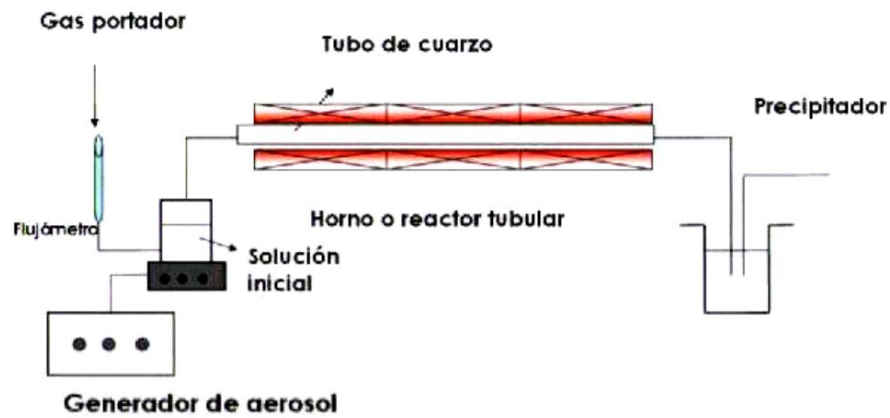


Fig. 2.11 representación esquemática de un *Spray Pyrolysis Depositon* (SPD)

Esta técnica es una de las técnicas más utilizadas para procesar películas delgadas debido a la simplicidad del método. Un equipo de *spray pyrolysis* consiste básicamente de una cámara de reacción y un atomizador. Una placa de acero y cerámica, es usada para sostener el sustrato, puesto en esta placa puede ser mantenido a la temperatura que se desee fabricar la película, se observa en la figura 2.11 un esquema del equipo usado para la fabricación de las películas de ZnO.

2.4.5 Sol-Gel:

EL proceso Sol-Gel para la fabricación de materiales cerámicos no es ninguna novedad. De hecho, es un proceso que descubrió a finales del siglo XIX aunque no se estudió de forma intensa recién en los años 30 luego de la cual esta técnica pierde interés y ya no fue hasta principios de los 70 cuando se sintetizaron geles de sales inorgánicas que fueron transformados en vidrio sin necesidad de altas temperaturas ni fusión consiguiéndose un óxido inorgánico con propiedades deseadas de dureza, transparencia óptica, estabilidad

química, porosidad y una buena resistencia térmica a baja temperatura comparado con los métodos tradicionales hasta ese entonces. Posteriormente, el método Sol-Gel permitió desarrollar películas, fibras y polvos de partículas con un tamaño manométrico.

Este método es un proceso flexible que permite procesar materiales a temperatura ambiente, además es una técnica de relativamente bajo costo ya que no se requieren equipos sofisticados para su utilización. Otras de las ventajas es que además de películas delgadas también se pueden obtener diferentes tipos de estructura tales como nano partículas, monolitos o polvos de alta pureza.

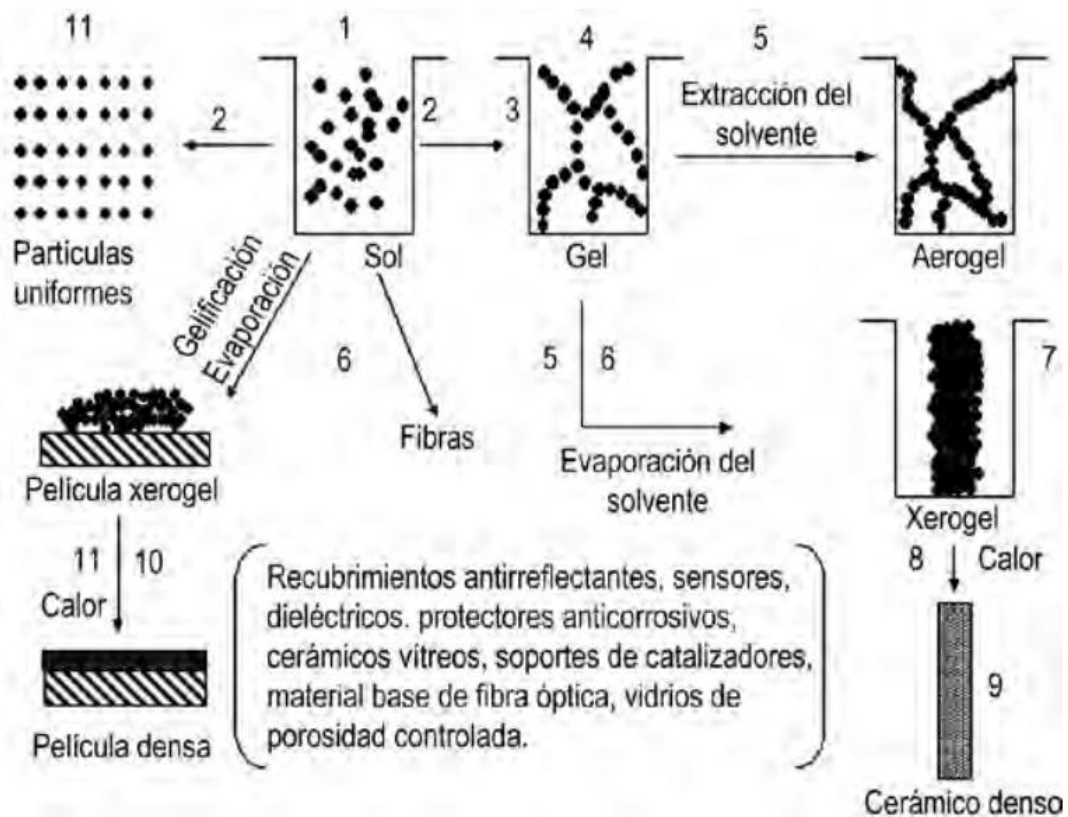


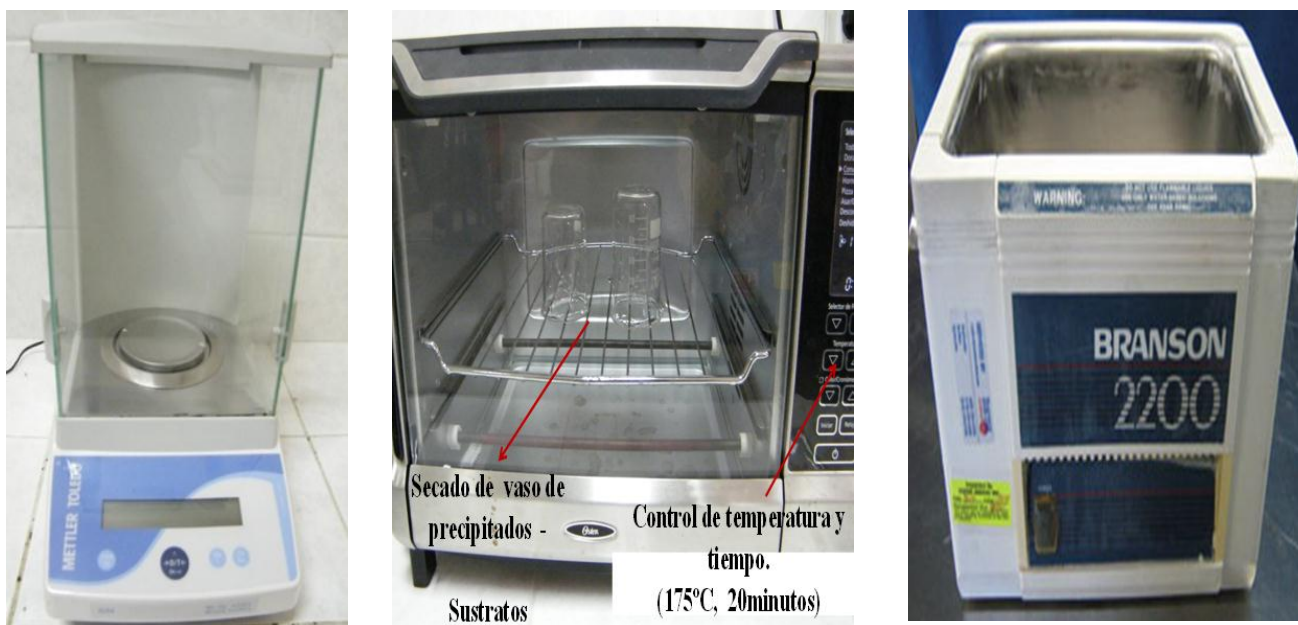
Fig. 2.12 Descripción esquemática de las diferentes vías metodológicas que engloban las técnicas Sol-Gel.

Capítulo 3

Materiales y métodos.

3.1 Preparación de sustratos.

Como sustratos se utilizaron vidrios Corning rectangulares de 1.0x1.5 cm, cortados (13x26x1mm) a partir de láminas porta-objetos empleados en microscopia óptica. La limpieza de estos sustratos se hizo sumergiéndolos en ácido nítrico diluido [HNO_3] inmersos por 10 minutos, luego enjuagados con agua destilada, inmediatamente los sustratos son inmersos en metanol y agitados con baño ultrasónico durante 5 minutos mediante un equipo Branson, finalmente se procede a realizar el secado con ayuda de una estufa para luego colocarlos en un horno a temperatura de 175°C durante 20 minutos.



3.2 Preparación de la solución.

La solución precursora fue preparado usando acetato de Zinc dihidratado $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$ al 99.5% de pureza y PH=7, en 100ml de metanol $[CH_3OH]$, como solvente, a 0.2 M. El proceso de disolución se realizo mediante agitación magnético hot plate-Stirrer VWR por un tiempo de 30 min, tiempo en el cual se obtuvo una solución trasparente.

3.3 Síntesis de las películas de ZnO.

El cálculo de la cantidad en gramos de acetato de zinc granulado utilizada, se realizo a través de la siguiente operación; ver detalles en referencia.

$$[masa(gr)] = 0,2(mol / l) \times 219,492(gr / mol) \times 0,1(l) \times 99.5\% = 4,36789 gr \quad (3.1)$$

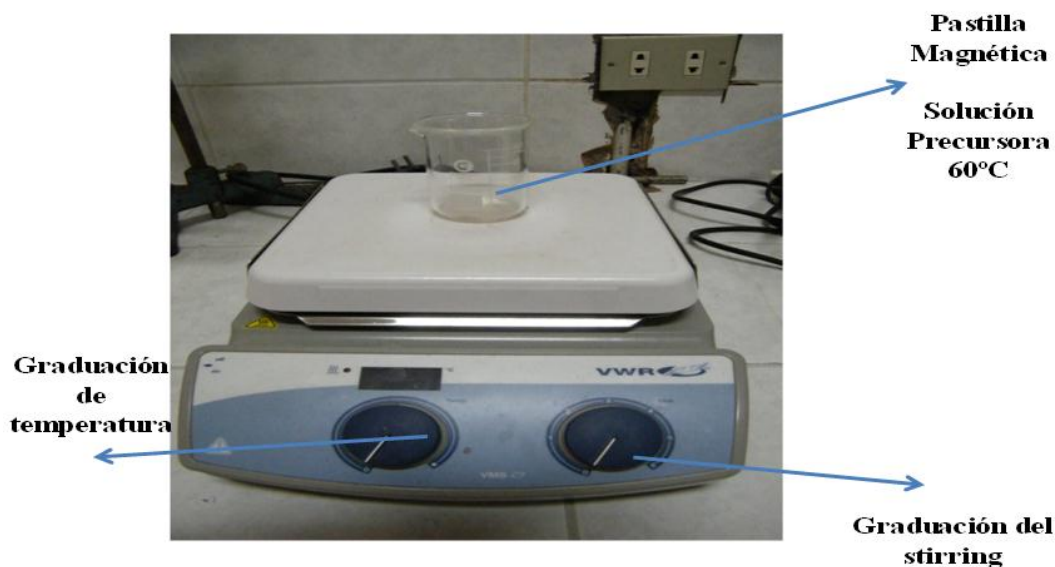


Fig.3.2 Equipo de Hot plate-stirrer VWR.

3.4 Procedimiento experimental.

Películas delgadas de ZnO han sido preparadas por la técnica del rociado pirolítico sobre substratos de vidrio Corning (índice de refracción $n=1.46$). El sistema de rociado pirolítico utilizado en este trabajo se muestra en la Figura 3.3. El equipo consiste básicamente de una cámara de vidrio (a), el cual sirve de colector para el reciclaje de la solución y dentro de la cual se encuentra el pulverizador (p); una tobera superior de vidrio (b) por donde ascienden las gotas más finas hasta llegar a un sustrato donde se llevará a cabo la reacción pirolítica. El conjunto cámara y tobera están acoplados a un sistema móvil (c) con movimiento oscilatorio constante de 1.36 cm/min. La presión y el flujo de gas portador se controló con un manómetro (d) y fluxímetro (e), respectivamente.

La películas se depositaron durante un tiempo de 15 minutos, siendo la presión de aire de 30 Psi, el flujo de aire de 6 l/min y la temperatura de síntesis de las películas fue de 300, 350, 400 y 500°C.

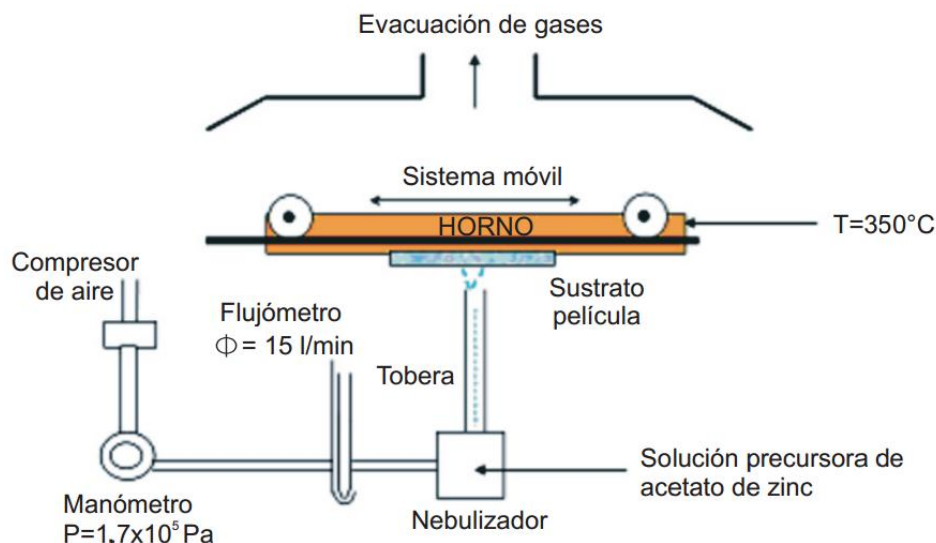


Fig. 3.3 Representación esquemática del sistema de rociado pirolítico

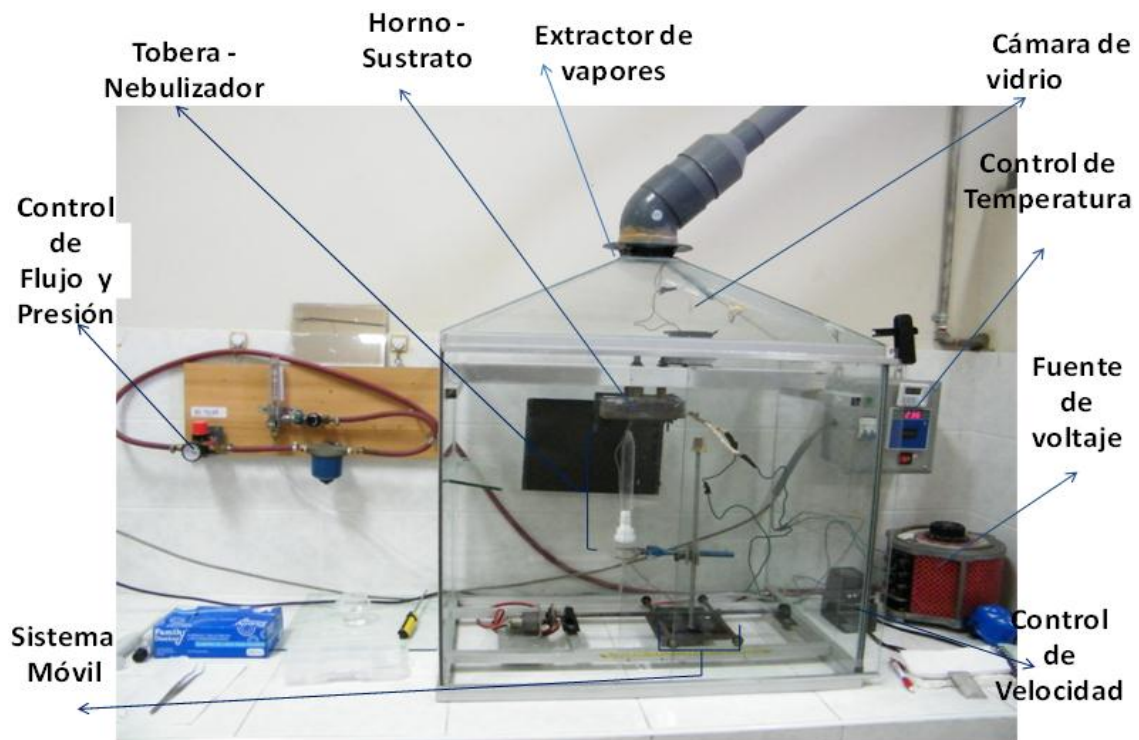


Fig.3.4 Equipo de Rociado Pirolítico (Spray Pyrolysis), Facultad de Ciencias, Laboratorio de Física de Materiales, Sección Nanociencia y Nanotecnología – Universidad Nacional de Trujillo.

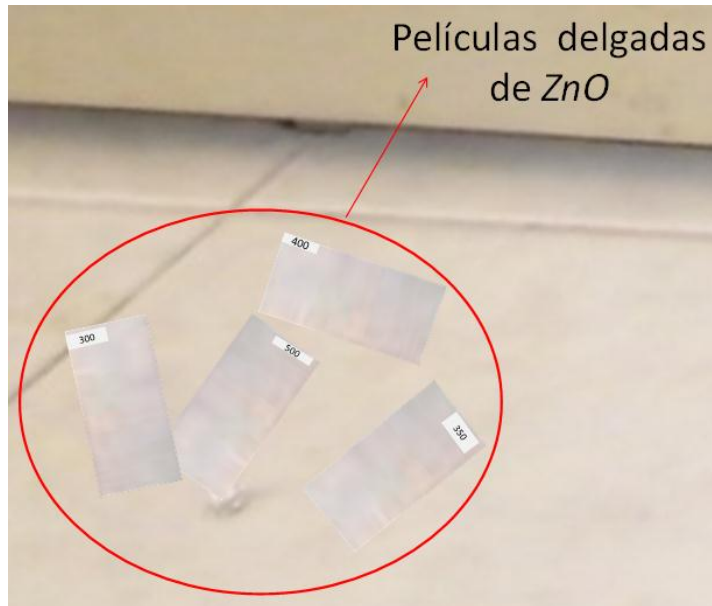


Fig.3.5 Películas delgadas de ZnO.

3.5 Caracterización por difracción de rayos X.

Los rayos X están constituidos por fotones de energías tales que en su proceso de interacción con la materia producen efectos ionizantes (efecto fotoeléctrico, efecto Compton, formación de pares electrón-positrón) y abarcan un rango de longitudes de onda en gran parte coincidente con el de los fotones gamma de fuentes radiactivas de uso médico e industrial [2]. Los rayos X son radiaciones electromagnéticas, como lo es la luz visible, o las radiaciones ultravioleta e infrarroja, y lo único que los distingue de las otras radiaciones electromagnéticas es su llamada longitud de onda, que es del orden de 10^{-10} m (equivalente a la unidad de longitud conocida como angstrom, Å). Para poder generar rayos X en forma convencional, es necesario contar con los siguientes elementos:

- Tubo o ampolla de rayos X.
- Fuente de alta tensión.
- Circuito y/o sistema de control de emisión.

3.5.1 Difracción de rayos X:

Cuando el haz de rayos X incide sobre un cristal, provocara que los átomos que conforman a este dispersen a la onda incidente tal que cada uno de ellos produce un fenómeno de interferencia que para determinadas direcciones de incidencia será destructivo y para otras constructivo surgiendo así el fenómeno de difracción [4]. Este fenómeno de la difracción puede describirse mediante la ley de Bragg que predice la dirección en la que se da interferencia constructiva entre los haces de rayos X dispersados coherentemente por un

cristal:

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta \quad (5.1)$$

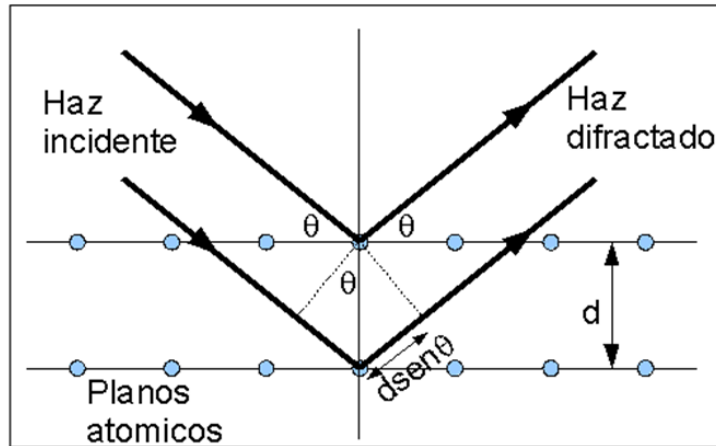


Fig. 3.6 Difracción de rayos en un cristal.

La aplicación de la técnica de difracción de rayos X en películas delgadas requiere mayor cuidado que su aplicación en sólidos comunes debido a que el poder penetrante de los rayos X con ángulos de incidencia típicos, su longitud de trayectoria que atraviesa las películas es también corta para producir haces difractados de suficiente intensidad. Bajo tales condiciones, el sustrato en vez de la película, domina la dispersión de la señal de rayos X, por lo que, los picos de difracción generados en las películas requieren grandes tiempos de conteo. Sin embargo, esto es superable con posibles controles de voltaje y corriente de la fuente generadora de los rayos X, modificando de esta manera el poder de penetración. Una alternativa de evaluar la difracción es usando el microscopio electrónico de transmisión (TEM), el cual nos da similar información de la difracción adicionado a su performance sobre áreas seleccionadas muy pequeñas.

Para la evaluación estructural de las películas sintetizadas en el presente trabajo, se obtuvieron patrones de difracción utilizando un Difractómetro Kristalloflex-Siemens, Daco-MP., el cual posee un sistema de potencia de difracción conteniendo un tubo de rayos X de Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) con un voltaje de aceleración igual a 30Kev/30mA. Los barridos fueron realizados con ángulos de 2θ con valores entre 30° y 70° con una velocidad de $2^\circ/\text{min}$, y un paso típico alrededor de $0,02^\circ$, con el fin de observar las fases presentes, orientación cristalográfica, parámetro de red, y tamaño del cristalito.

3.6 Mediciones de transmitancia óptica.

La transmitancia $T(\lambda)$ de las películas de ZnO depositadas sobre sustratos de corning fueron medidas usando un espectrofotómetro UV – Vis, AT 8452 (λ :100 – 900 nm).

Esta técnica consiste en incidir fotones de energías determinadas sobre la muestra de tal forma que exciten electrones.

La interacción entre un haz de fotones y el semiconductor puede tener lugar a una absorción total o parcial de la energía del haz por parte del material. En este fenómeno, un fotón transfiere su energía a un electrón, provocando su excitación desde un determinado nivel de energía a uno de energía superior superando de esta manera la banda prohibida E_g . Al incidir el haz de luz monocromática normalmente sobre la muestra semiconductor de caras plano-paralelas, la transmitancia (T) de ésta, es decir la relación entre la intensidad del haz incidente y la del transmitido, se observara el espectro mostrado en la figura 4.4 producto de las interferencias producidas.

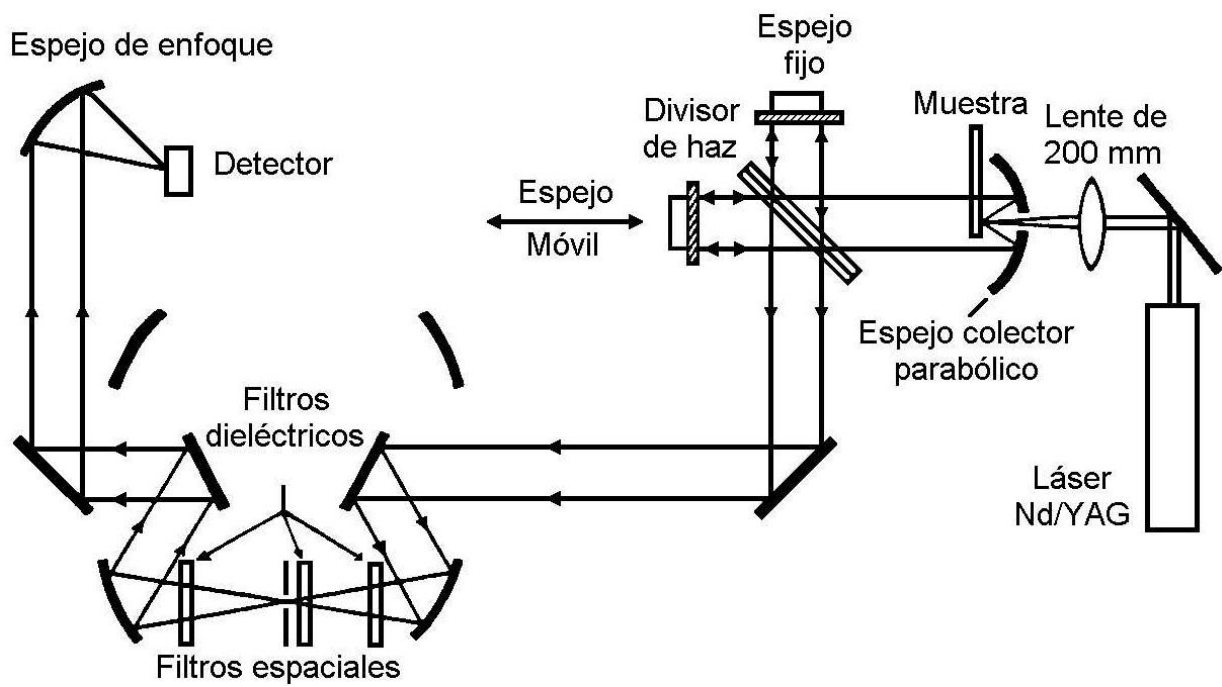


Fig. 3.7 Esquema óptico de un espectrofotómetro UV-Vis empleado para determinar espectros de transmitancia y absorbancia óptica de películas delgadas de ZnO.

Capítulo 4

Resultados y discusiones.

4.1 Caracterización estructural de las películas de ZnO.

4.1.1 Difracción de rayos X:

La figura 4.1 muestra los difractogramas de rayos X para películas a 300, 350, 400 y 500°C.

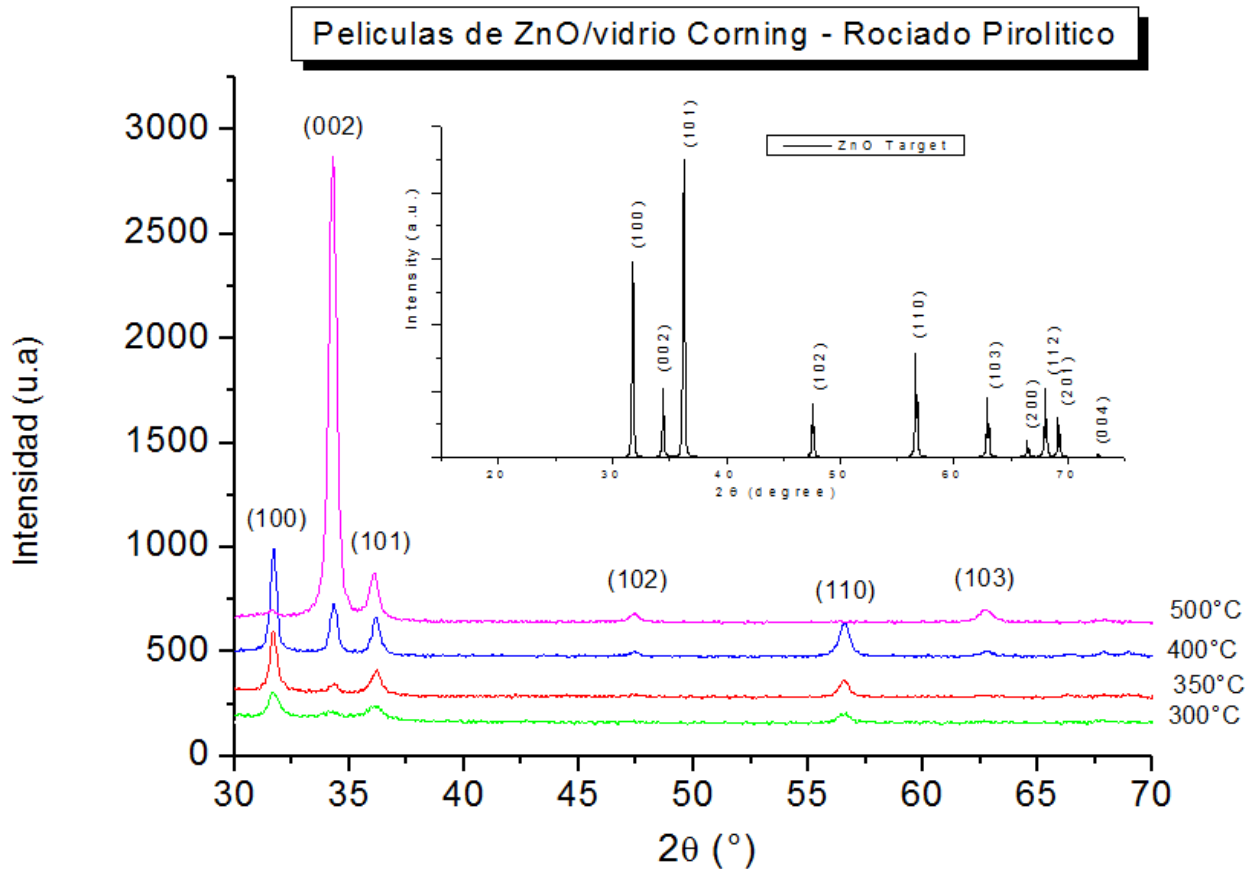


Fig. 4.1 Difractogramas de películas delgadas de ZnO sintetizadas sobre vidrio Corning

En la figura se observa picos de difracción (100),(002),(101) a temperaturas de 350, 400 y 500°C, indicando un crecimiento orientado al eje c que corresponde a los planos de difracción (002) y (101) que corresponden a las superficies polares y no polares respectivamente, representando así la estructura de la wurtzita.

No se observan picos de difracción a temperatura de 300°C indicando la no existencia de cristalinidad. Los picos de difracción a temperaturas mayores a 300°C se notan más intensos (definidos y estrechos), indicando películas con un elevado grado de cristalinidad. Estos resultados nos mostrarían un posible efecto de la temperatura de síntesis sobre la estructura, propiedades ópticas de las películas delgadas de ZnO.

A fin de caracterizar mejor la estructura obtenida de cada una de las películas, se estimaron el tamaño de grano, distancia interplanar y el parámetro c de la estructura hexagonal wurtzita. El tamaño de grano se calculó mediante la ecuación de Scherrer (Ec. 4.1)

$$\beta_{hkl} = \frac{0.89\lambda}{L_{hkl} \cos \theta} \quad (4.1)$$

Con $\lambda = 0,154056$ nm; siendo L_{hkl} la medida del ensanchamiento de pico (en radianes) medido a una intensidad igual a la mitad de la intensidad máxima del pico de difracción (FWHM); θ es el ángulo en el cual se satisface la ley de Bragg para el valor particular de λ . Para medir el ancho del pico a la mitad de la altura, se ajusta el pico con la curva Lorentziana y se toman los datos del ajuste arrojado utilizando el programa OriginPro8.

La distancia interplanar d para la dirección (002) se calculó a partir de la ecuación de la ley de Bragg:

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (4.2)$$

Además, con la siguiente ecuación podemos obtener el parámetro c en la dirección (002), para valores $h = k = 0$ y $l = 2$.

$$\frac{1}{d^2_{hkl}} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.3)$$

Por consiguiente:
$$\frac{1}{d^2_{hkl}} = \frac{4}{c^2} \quad (4.4)$$

Resultando entonces: $c = 2d_{002}$

Los valores calculados para la posición del pico (002) de cada una de las películas observadas en el patrón de difracción (Fig. 4.1), el tamaño de grano, la distancia interplanar d_{002} y el parámetro de red c se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Valores correspondientes a la posición del pico (002), tamaño de grano, distancia interplanar y parámetro de red c .

Temperatura de síntesis (°C)	Posición del Pico 2θ , (002)	Tamaño de grano (nm) ± 0.1	Distancia interplanar, d_{002} (Å)	c (Å)
300	-	-	-	-
350	34,35	20,55	2,60	5,20
400	34,32	18,68	2,61	5,22
500	34,28	17,12	2,61	5,22

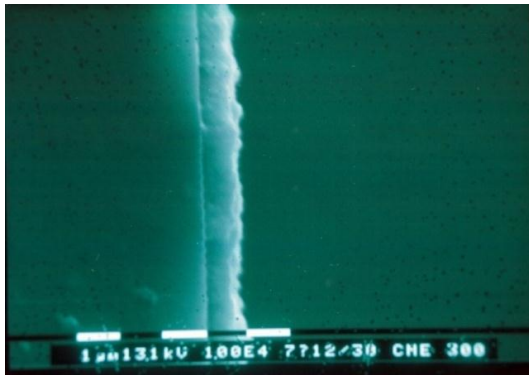
En la tabla 4.1 se indica el tamaño de grano que da origen a la difracción, el tamaño de grano fue calculado a partir del patrón de difracción de rayos X de la figura 4.1. Como se puede observar, el incremento de la temperatura de síntesis origina una disminución del cristal con planos atómicos equidistantes y es posible que estas películas sean policristalinas.

4.1.2 Microscopia electrónica de barrido:

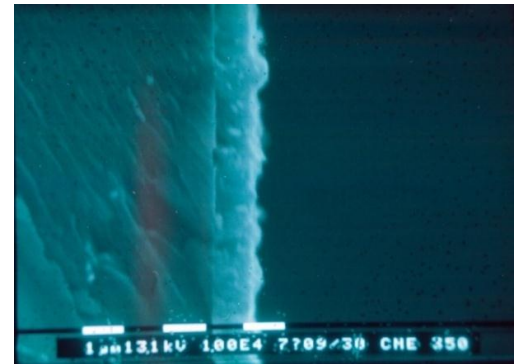
Las películas de ZnO crecidas sobre sustratos de vidrio muestran buena adherencia al sustrato. Las figuras 4.3(a), 4.3(b), 4.3(c) y 4.3(d) muestran micrografías de las películas de ZnO, como se puede observar, las películas sintetizadas a temperaturas mayores a 350°C son más uniformes y con espesores más definidos. Micrografías se realizaron con microscopio electrónico de barrido SEM 505 – Philips sometiendo la muestra a una cámara de vacío $10^{-5} Torr$ y un haz de electrones de $10^{-7} A$ y voltaje de 13 keV, el equipo tiene un rango de aumento de 6x a 120000x, posee análisis EDS y una cámara para muestras de 284 mm de diámetro con una presión de análisis de 1.9 torr y un diámetro de barrido de 10nm a 50µm. Utilizando este equipo (figura 4.2) se midió el espesor aparente de las películas. Para la medición, las muestras fueron incididas con el haz de electrones mediante un ángulo de 55° con respecto a la horizontal, obteniendo las micrografías mostradas en la figura 4.3



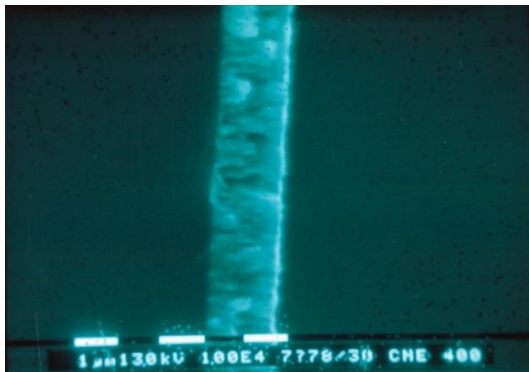
Fig.4.2 Microscopio electrónico de barrido SEM.



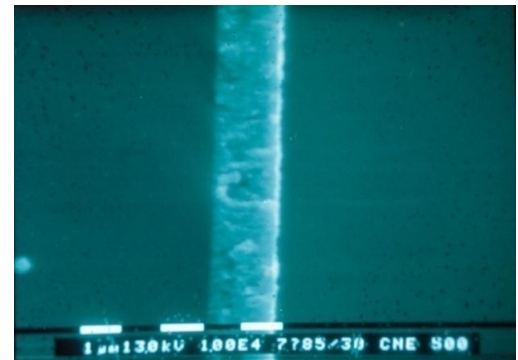
4.3(a)



4.3(b)



4.3(c)



4.3(d)

Fig. 4.3 Espesores de las películas de ZnO sintetizadas sobre sustratos de vidrio a las temperaturas de: (a) 300 °C ; (b) 350 °C; (c) 400 °C y (d) 500 °C.

Tabla 4.2: Valores promedios del espesor de las películas de ZnO.

Temperatura del sustrato (°C)	Espesor promedio de las películas delgadas de ZnO (μm)
300	0.88
350	1.10
400	1.55
500	1.57

4.2 Caracterización óptica: Transmitancia, absorbancia y banda prohibida.

4.2.1 Transmitancia óptica:

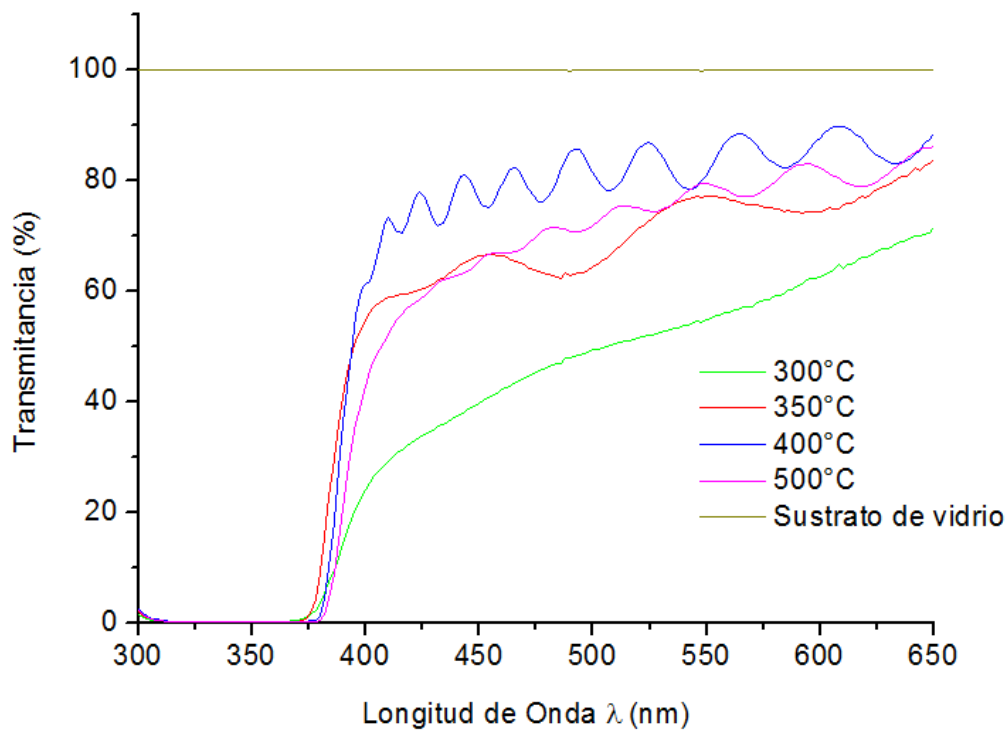


Fig. 4.4 Espectros de transmitancia de las películas de ZnO.

El espectro de transmitancia muestra claramente que para las películas sintetizadas a 350, 400, y 500°C exhiben una transmitancia óptica por encima del 60% en el rango visible, la transmisión disminuye en la región UV tal como se puede observar en el grafico para longitudes de onda menores a 380 nm, esto nos indicaría una absorbancia en este intervalo, el cual es característico en películas de ZnO.

4.2.2 Absorbencia óptica:

En la interacción entre un haz de fotones y un material semiconductor puede tener lugar una absorción total o parcial de la energía del haz por parte del material. En dicho fenómeno un fotón transfiere su energía a un electrón, provocando su excitación desde un determinado nivel de energía a uno de energía superior. La absorción óptica en un semiconductor puede ser debida a varios tipos de transiciones, como por ejemplo transiciones banda a banda, transiciones entre niveles localizados y bandas o la formación de excitones. De esta manera, el conocimiento del espectro de absorción proporciona una gran cantidad de información sobre las propiedades del semiconductor. La energía a la que ocurre la absorción indica la separación existente entre los dos niveles implicados en la transición.

En la figura 4.4 se muestra los espectros de absorción en el rango de 300 a 800 nm para las películas de ZnO sintetizadas a 300, 350, 400 y 500°C, calculados a partir del espectro de transmitancia, se observa que la intensidad de absorbancia aumenta conforme se

incrementa la temperatura de síntesis; los picos de absorción están bien definidos a las temperaturas de 300, 350, 400 y 500°C, indicando una mejor naturaleza excitónica a estas temperaturas.

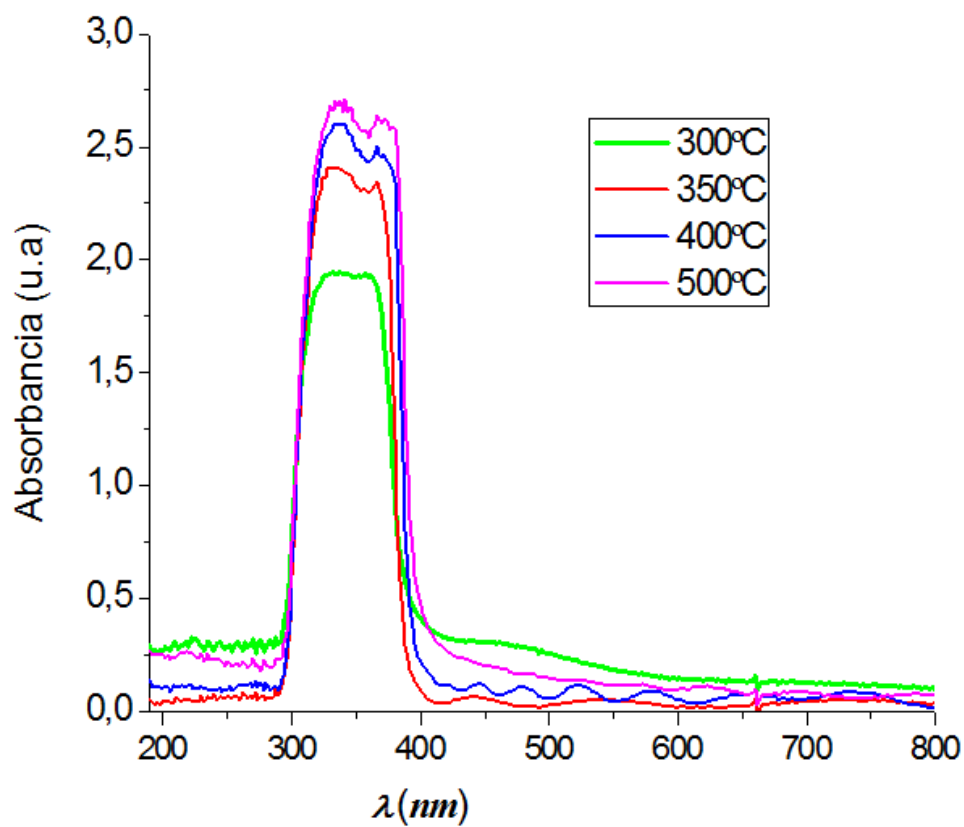


Fig. 4.5 Espectros de absorción de películas de ZnO

4.2.3 Banda prohibida:

Una forma muy utilizada para determinar la brecha de energía o band gap de una película delgada, es utilizando la denominada relación de Tauc, que se obtiene al suponer que la parte central en los bordes de las bandas de conducción y la de valencia es parabólica

$$\alpha(h\nu) \equiv \Lambda(h\nu - E_g)^m \quad (4.1)$$

La banda prohibida fue calculada usando el valor de $m = 1/2$ para una transición directa permitida. En la siguiente ecuación para semiconductores de banda directa.

$$\alpha(h\nu) \equiv \Lambda(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (4.2)$$

Tener en cuenta que $m = 3/2$ para una transición directa prohibida, $m = 2$ para una transición indirecta permitida, $m = 3$ para una transición indirecta prohibida.

Donde h es la constante de Planck, ν frecuencia del fotón incidente, α el coeficiente de absorción y Λ una constante independiente de la frecuencia. Al calcular el coeficiente de absorción α y graficar α^2 vs $h\nu$ (energía del fotón), como se muestra en la figura 4.5,

por extrapolación de la dependencia lineal de $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$ hasta la intersección con el eje de energía. De esta manera la intersección con este eje de energías muestra la cantidad de energía necesaria para que los electrones o portadores de carga en las películas puedan “saltar” de la banda de conducción a la banda de valencia y así determinar el ancho de banda, haciendo uso también de los espectros de transmitancia de la figura 4.4 se calculó E_g .

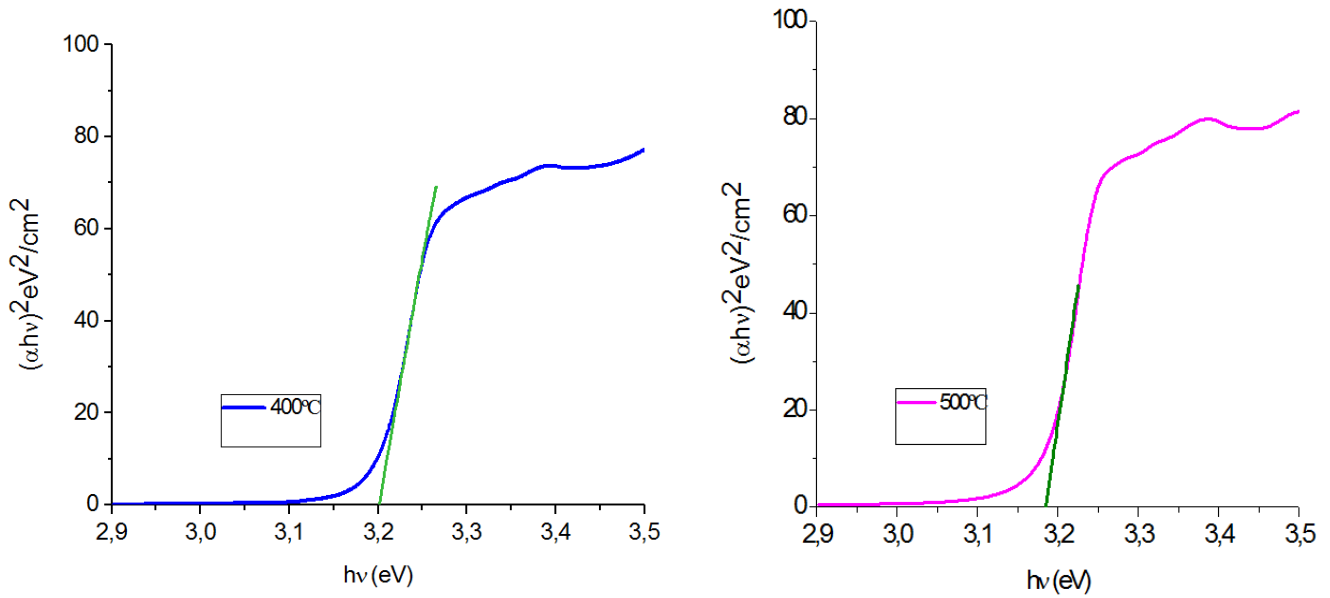


Fig. 4.6 Banda prohibida, disminución del band gap óptico conforme se incrementa la temperatura de síntesis

Las gráficas $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$ mostradas en la figura 4.5 fueron realizadas con la intención de calcular los valores de la banda prohibida de acuerdo al método de Tauc, Davis and Mott. Las líneas proyectadas sobre el eje de las abscisas ($h\nu$) permiten estimar el ancho de banda prohibida teniendo en cuenta la ecuación 4.2.

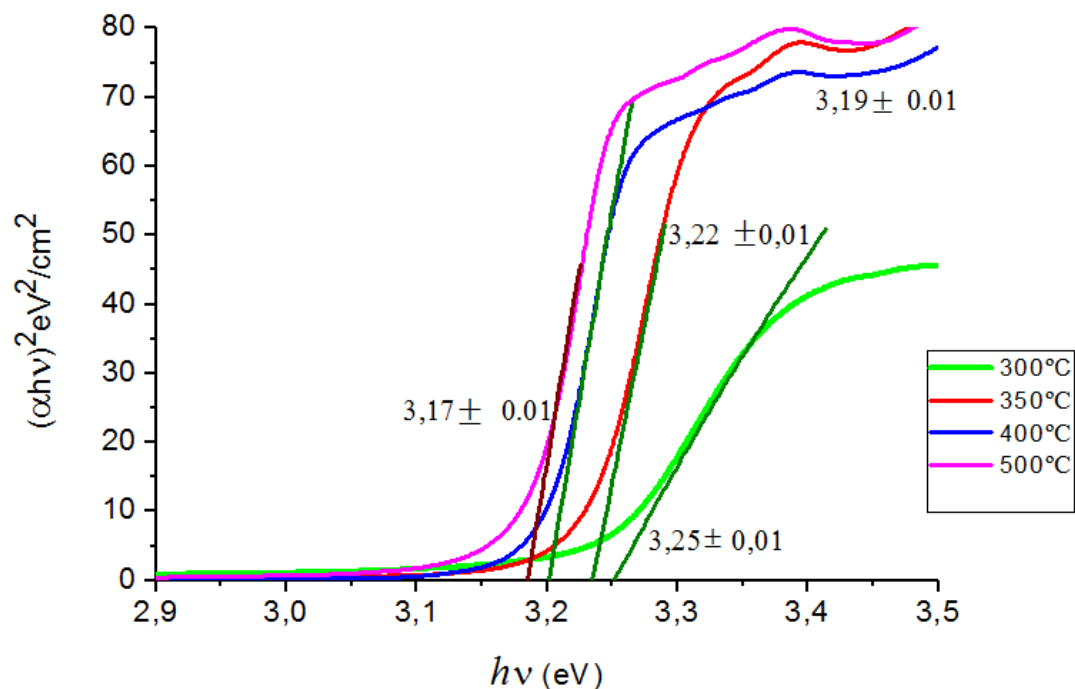


Fig. 4.7 Variación de la banda prohibida con la temperatura de síntesis en las películas de ZnO.

De la figura 4.6 se puede decir que existe una disminución del band gap óptico desde 3,25 eV (para 300 ° C) hasta 3,17 (para 500°C) conforme se incrementa la temperatura de síntesis. Este decrecimiento en la banda prohibida podría atribuirse a la disminución del tamaño de grano y la influencia de vacancias de oxígeno por el aumento de la temperatura, tal como se demostró en el análisis de difracción de rayos X (Tabla 4.1).

Es importante remarcar que existe un decrecimiento de la banda prohibida en las películas de ZnO con el aumento de la temperatura de síntesis, esto se deba posiblemente a un mejoramiento en la cristalinidad y un aumento del espesor como refleja en patrón de difracción de rayos x y las micrografías (fig. 4.1, Tab. 4.2 respectivamente).

El mejoramiento en la cristalinidad puede entenderse también como una reducción en los defectos de la red vacancias de oxígeno o impurezas. Estas propiedades estructurales en películas de ZnO son importantes para ser utilizados en múltiples aplicaciones, como sensores de radiación UV, etc.

La energía de la brecha de banda en películas semiconductores de ZnO sufre variaciones debido a factores estructurales de crecimiento tales como el esfuerzo y a variaciones de la concentración de portadores, los cuales nos permiten manipularlos para diseñar brechas de bandas convenientes para diodos de emisión y láseres.

Los resultados aquí observados demuestran que la técnica de rocío pirolítico es capaz de crecer nanoestructuras de ZnO de buena calidad.

Capítulo 5

Conclusiones.

- La banda prohibida disminuye con el incremento de la temperatura de síntesis atribuido posiblemente a la disminución del tamaño de grano y reorganización en la estructura o posible defectos intrínsecos, como vacancias de oxígeno. Estos resultados indican, por lo tanto la influencia de la temperatura sobre la banda prohibida.
- Los espectros de absorbancia mostrados, se observa que la absorción óptica aumenta con el incremento de la temperatura de síntesis; atribuido posiblemente a la variación del espesor de la película de ZnO. La naturaleza excitónica es más definida a mayores temperaturas debido a una mejor calidad óptica.
- Cambios en la morfología de la película producen corrimientos del ancho de la banda prohibida, de 3.25 eV hasta 3.17 eV, esto permite la utilización de películas de ZnO en múltiples aplicaciones; como la fabricación de sensores fotoconductores optimizados para bandas espectrales específicas.
- La banda prohibida de las películas delgadas de ZnO en estudio, puede ser controlada con la temperatura de síntesis según la aplicación de interés utilizando la técnica de spray pyrolysis.

Referencia bibliográfica

- [1] P. Pushparajaht, A. Kariem Aroft y S. Radhakrishnat, Physical properties of Spray pyrolysed pure and doped ZnO thin films J. Phys.D: Appl. Phys. 27(1994) 1518-1521.
- [2] B.J . Graham , Virgilio Acosta, Fisica Moderna
- [3] G.Burns,Solid State physics,Academic Press,Inc ,Orlando, Florida 1998, 65-67.
- [4] Alonso Finn, Fisica III
- [5] Ch.Q.Sun, Oxidation electronics: bond- band-barrier correlation and its applications, Progress in Materials Science 48 (2003) 521-685.
- [6] C.J Sheppard, Thesis: Structural and Optical Characterization of Si:H and ZnO, Faculty of science at the Rand Afrikaans University(2002).
- [7] L .M. Angelats S, Thesis: Structural,electrical, optical and magnetic properties of ZnO based films produced by magnetron sputtering, University of Puerto Rico-Mayaguez Campus,2006.
- [8] L. Chopra, S. Major, D. K. Pandya, Thin Solid Films 102p (1983).
- [9] H. Sato, T. Minami, Y. Tamura, S. Takata, T. Mori, N. Ogawa, Thin Solid Films 246 (1994)86.
- [10] R.L.Nima. M. Tesis: Efecto de la temperatura sobre el índice de refracción en películas de ZnO sintetizadas por la técnica de rocío pirolítico Spray Pirolisys.35p

ANEXOS

Fig. 5.1 Cálculo del valor de E_g para la película de ZnO crecida a 300 y 350°C

ZnO 300°C					ZnO 350°C				
Transmittance	α	λ (nm)	$h\nu$	$(\alpha h\nu)^2$	Transmittance	α	Wavelength (nm)	$h\nu$	$(\alpha h\nu)^2$
51,1807	0,29089378	190	6,53684211	3,61580379	63,8522	0,19482413	190	6,53684211	1,6218904
54,0946	0,26684609	192	6,46875	2,979630487	62,0497	0,20726031	192	6,46875	1,79751713
53,2461	0,2737122	194	6,40206186	3,070633839	62,4895	0,20419295	194	6,40206186	1,70891798
54,4551	0,26684609	196	6,33673469	2,859253912	61,7279	0,20726031	196	6,33673469	1,72489774
52,0146	0,2737122	198	6,27272727	2,947821017	62,8153	0,20419295	198	6,27272727	1,64056824
52,8733	0,26396144	200	6,21	2,68697842	63,6976	0,2095185	200	6,21	1,69288689
53,8273	0,28387474	202	6,14851485	3,046449213	62,0584	0,20193456	202	6,14851485	1,54156473
50,1783	0,27676358	204	6,08823529	2,839231113	64,4359	0,19587693	204	6,08823529	1,4221632
49,715	0,2689974	206	6,02912621	2,630297842	63,4028	0,20719943	206	6,02912621	1,56057931
52,7508	0,29948406	208	5,97115385	3,19789305	60,5274	0,1908721	208	5,97115385	1,29897691
50,8777	0,30351256	210	5,91428571	3,222240316	59,3356	0,19789156	210	5,91428571	1,36980629
50,8902	0,27777095	212	5,85849057	2,648165461	61,7735	0,21804798	212	5,85849057	1,63183262
49,7325	0,29347253	214	5,80373832	2,901018889	61,1086	0,22668466	214	5,80373832	1,73085192
52,7752	0,29336584	216	5,75	2,845475046	61,4056	0,20919779	216	5,75	1,44693786

Fig. 5.2 Cálculo del valor de E_g para la película de ZnO crecida a 400 y 500°C

Microsoft Excel - t ENCONTRAR EL GAP

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1			ZnO 400°C						ZnO 500°C			
2												
3	Transmittanc	α	Wavelength (nm)	h ν	($\alpha h\nu$) ²		Transmittanc	α	Wavelength (nm)	h ν	($\alpha h\nu$) ²	
4	73,3091	0,13484211	190	6,53684211	0,77693929		58,2184	0,23493973	190	6,53684211	2,3585709	
5	74,1823	0,12969971	192	6,46875	0,70391256		60,036	0,22158825	192	6,46875	2,05463269	
6	73,201	0,13548299	194	6,40206186	0,75233151		59,7079	0,2239682	194	6,40206186	2,0559496	
7	74,8552	0,12969971	196	6,33673469	0,67547461		60,1839	0,22158825	196	6,33673469	1,97162587	
8	72,1668	0,13548299	198	6,27272727	0,72224132		58,1203	0,2239682	198	6,27272727	1,97372	
9	75,7627	0,12577802	200	6,21	0,61008836		58,9491	0,22051967	200	6,21	1,87533077	
10	76,3318	0,14166255	202	6,14851485	0,75866592		60,0191	0,23567215	202	6,14851485	2,09969875	
11	73,3297	0,12054456	204	6,08823529	0,53861453		58,7094	0,22952282	204	6,08823529	1,95269585	
12	75,0738	0,1172945	206	6,02912621	0,50010825		56,4678	0,22171052	206	6,02912621	1,78682227	
13	72,8521	0,13472009	208	5,97115385	0,64711469		58,7259	0,23129236	208	5,97115385	1,90738819	
14	73,7872	0,1245116	210	5,91428571	0,54228081		54,4474	0,24819913	210	5,91428571	2,15479083	
15	73,0854	0,13755792	212	5,85849057	0,64944548		57,6222	0,23117032	212	5,85849057	1,83415322	
16	72,8546	0,13201897	214	5,80373832	0,58706788		55,7365	0,26402285	214	5,80373832	2,34800322	
17	71,8379	0,13616937	216	5,75	0,61304811		57,3918	0,23941016	216	5,75	1,89505081	

Fig. 5.3 $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$ obtenidos de los espectros de transmitancia

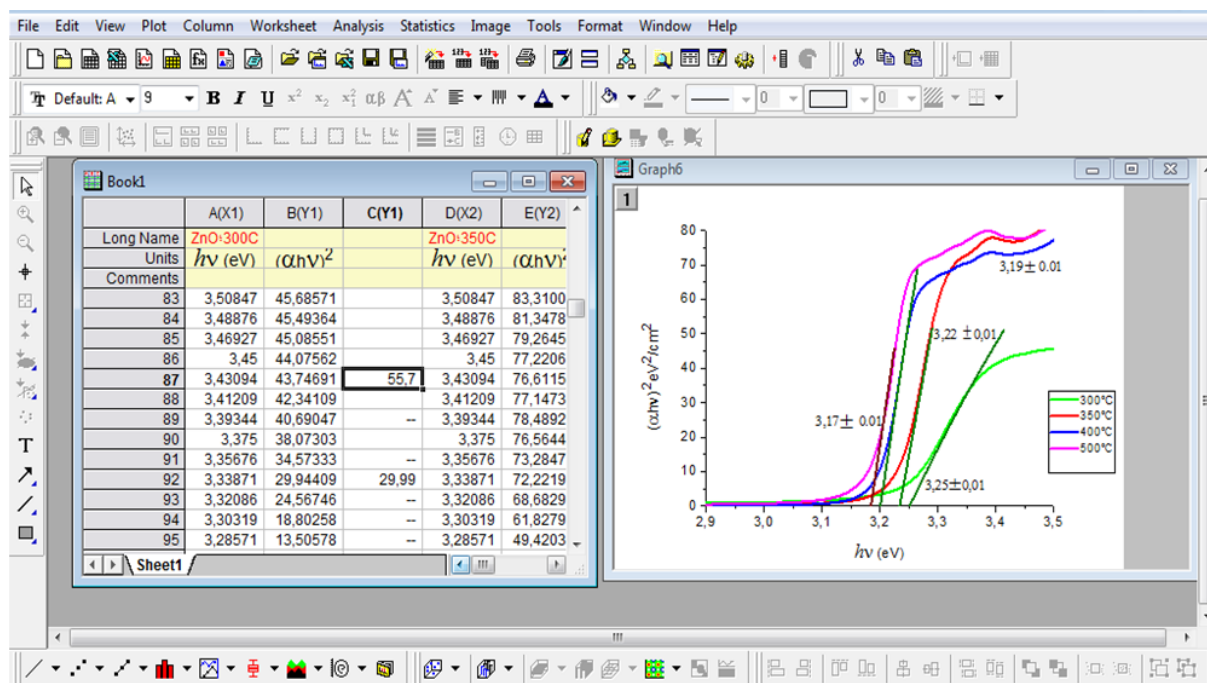


Fig. 5.4 Absorbancia vs longitud de onda

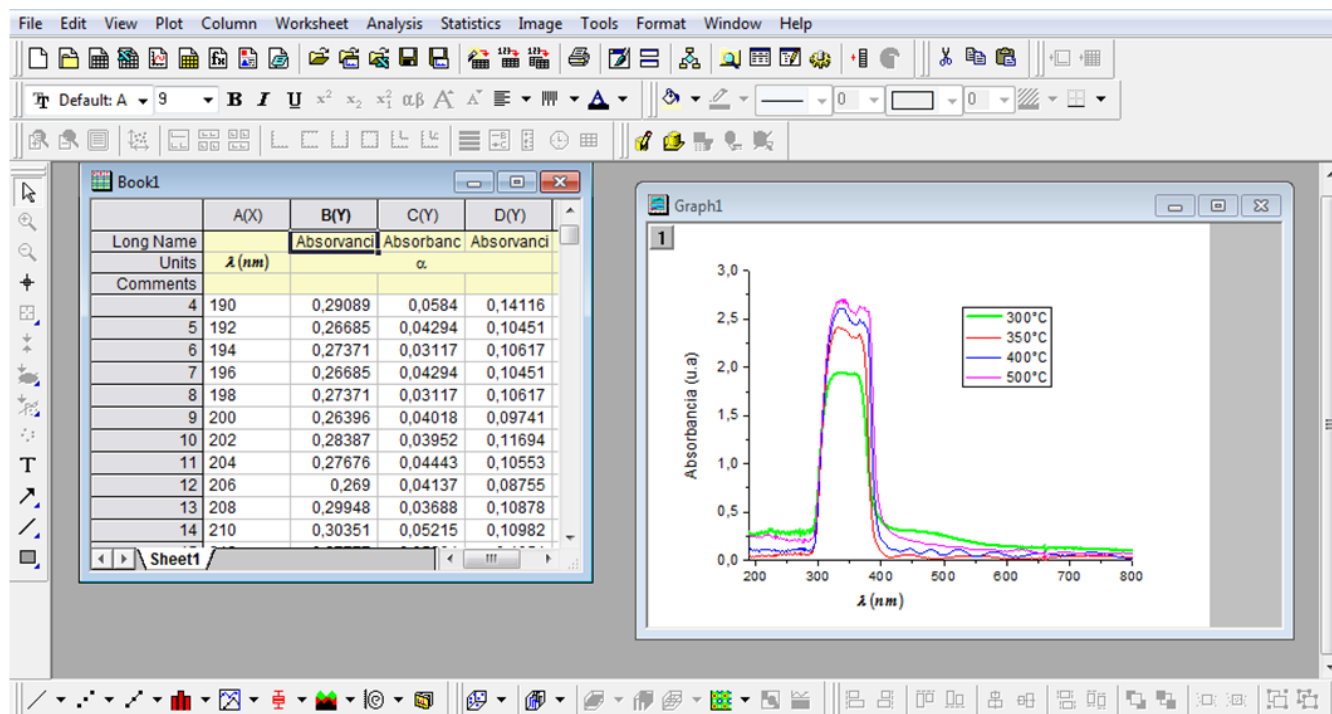


Fig. 5.5 Absorbancia vs longitud de onda

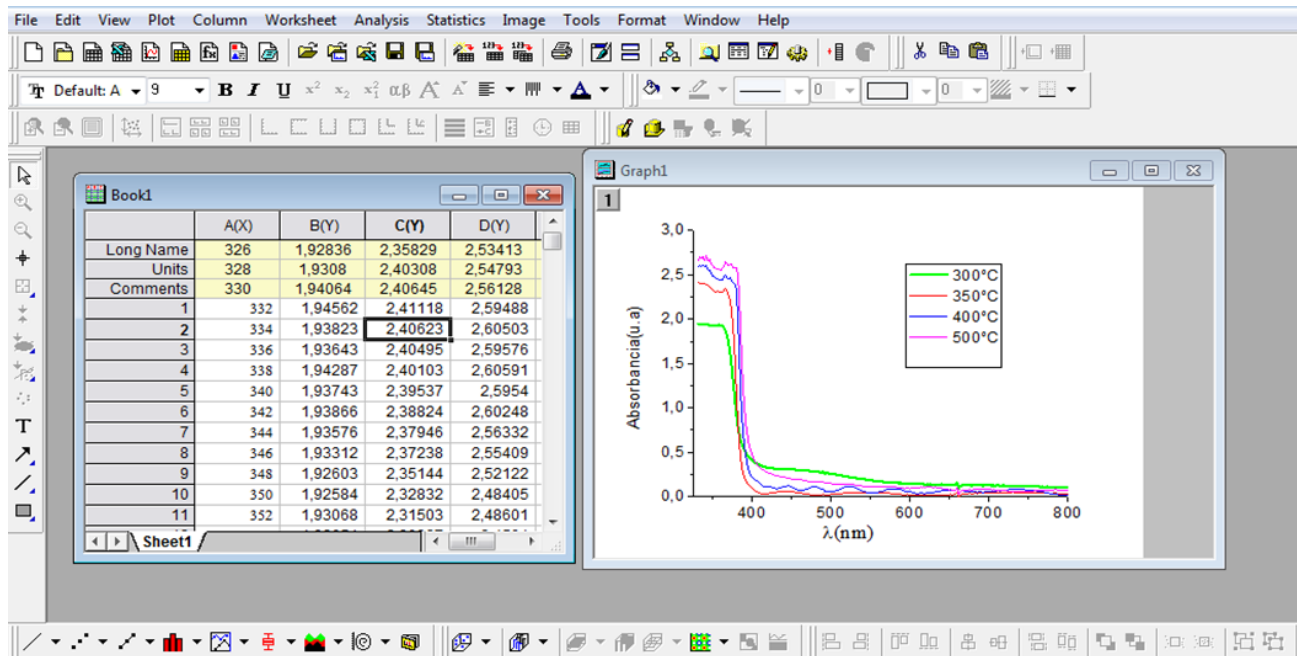


Fig. 5.6 Espectros de difracción de rayos X

